

Mejoramiento de subrasantes de tipo arcilloso mediante la adición de escoria de acero

Improvement of clayey subgrades through the addition of steel waste

Miguel Ángel Ospina-García¹
Saieth Baudilio Chaves-Pabón²
Luis Miguel Jiménez-Sicachá³

Recibido: junio 05 de 2019
Aceptado: febrero 26 de 2020

Resumen

El presente trabajo evalúa el comportamiento de mezclas de suelo arcilloso mediante la adición de escoria de acero, comparando con los criterios de calidad para ser una subrasante vial. El comportamiento de la mezcla de escoria de acería con arcilla caolinita, se estableció con una matriz de dosificación de aumento gradual, en porcentajes de: 25, 50 y 75%, a través del tamiz N°4. Los resultados indican que la escoria de acería funciona en materiales cohesivos, reduciendo la plasticidad hasta un 0%, y aumentando el valor del California Bearing Ratio, CBR, en un 378.92%. Se concluye que la escoria de acero, es un excelente complemento para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de una subrasante de arcilla caolinita. En una primera aproximación, la dosificación más recomendada es de un 25%, debido a que la disminución en la resistencia a la compresión e índice de plasticidad no fue tan alta como en las otras dosificaciones, pero sí aumenta el índice CBR y la densidad.

Palabras clave: estabilización de suelos, subrasante, arcillas, pavimento, propiedades mecánicas.

Abstract

This work evaluates the behaviour of clay soil mixture by adding steel waste/slag, comparing with the quality criteria to be a subgrade road. The behavior of the mixture of steel waste with kaolinite clay was established with a dosage matrix of global increase, in percentages of 25, 50 and 75% through sieve number 4. The results show that the steel waste works on cohesive materials, reducing plasticity by up to 0%, and increasing the California Bearing Ratio (CBR) value, by 378.92%. It is possible to conclude that the steel waste is an excellent complement for improving the physical and mechanical properties of kaolinite clay subgrade. In a first approximation, the most recommended dosage is 25%, because the reduction of resistance to compression and plasticity index was not as high as in other dosages, but it increases the CBR index and the density.

Keywords: ground stabilization, subgrade, clays, pavement, mechanical properties.

1 Ingeniero Civil, Magíster en Construcción, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia. E-mail: miguel.ospina@unimilitar.edu.co. ORCID: 0000-0003-3700-7495

2 Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería Geodésica y Cartografía, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia. E-mail: saieth.chaves@unimilitar.edu.co. ORCID: 0000-0001-6950-9401

3 Ingeniero Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia. E-mail: d7300311@unimilitar.edu.co. ORCID: 0000-0003-3579-7016

1. Introducción

La subrasante de una vía, en general, es una parte fundamental de la misma, de tal manera que si esta llega a colapsar, el pavimento también lo hará. Por lo tanto, uno de los parámetros de su evaluación dependerá de la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante, bajo las cargas del tránsito (Rondón-Quintana, Zafra-Mejía & Chaves-Pabón, 2018) (Rondón-Quintana, Hernández-Noguera & Urazán-Bonells, 2016). En Colombia, debido a las características de los suelos en la zona central del país, las sub-rasantes se caracterizan por estar compuestas de suelos blandos, ocasionando que las estructuras del pavimento requieran de un espesor superior al típico empleado (Rondón-Quintana & Reyes-Lizcano, 2015). Si la sub-rasante se mejora en sus características mecánicas (soporte a compresión, flexión y cortante), se disminuirá el espesor de la estructura de pavimento (Radhakrishnan & Anjan-Kumar, 2019). En consecuencia, una importante ventaja sería la optimización de recursos técnicos, económicos y ambientales, indiferente del tipo de estructura de pavimento a implementar (Ospina-García, Moreno-Anselmi & Rodríguez-Polo, 2017).

Por tanto, con una subrasante mejorada, las propiedades mecánicas del pavimento: esfuerzos, desplazamientos y agrietamientos, aumentarán (Dhar & Hussain, 2019). A su vez, la sub-rasante suele estar constituida por suelos en su estado natural (sin ninguna mejora), o por suelo con algún tipo de adición para su mejoramiento, tales como: la estabilización mecánica, la estabilización físico – química con aditivos (cemento Portland, la cal, el asfalto, escoria de acero, entre otras), o sub-rasantes reemplazando el suelo natural por material tipo granular tamaño rajón (Rondón-Quintana & Reyes-Lizcano, 2015; Moreno-Anselmi, Reyes-Ortiz & Ruiz-Acero, 2016).

En el caso de las subrasantes mejoradas, se emplean típicamente materiales como: cal, arena, fibra de coco, escoria granulada de alto horno y

cenizas volantes, para la estabilización del suelo. En los estudios de Dhar y Hussain (2019), éste tipo de materiales mejoran los valores del índice CBR, lo que conlleva a una mejora de sus propiedades mecánicas.

Igualmente, en la industria de producción de materias primas, se generan materiales de desecho que tienen un potencial de aprovechamiento del mismo, tales como la ceniza volante, la cascarilla de arroz y la escoria de acero (Dhar & Hussain, 2019). A estos elementos es posible reutilizarlos como adición en otro tipo de materiales, que podrían ser en el concreto (Ospina-García, Moreno-Anselmi, Sánchez-Saldana & Chaves-Pabón, 2018), en mezclas asfálticas (Rondón-Quintana, Zafra-Mejía & Chaves-Pabón, 2018), o en los componentes de una estructura de un pavimento.

En este estudio se realiza un análisis técnico de la mezcla entre un suelo típicamente empleado como subrasante en las estructuras de pavimentos (arcilla caolinita), en la zona de la sabana de Bogotá, Colombia, y escoria de acero. Este último es un subproducto de la industria de la fabricación de elementos en acero, para el cual es necesario buscar algún uso. Se realizan pruebas mecánicas de laboratorio propias en subrasantes, para comparar los resultados con las especificaciones de las normas del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), concluyendo respecto a las cualidades y desventajas como aditivos para este tipo de materiales.

2. Marco teórico y metodología

2.1 Referentes teóricos

Existen varios estudios a nivel mundial sobre aditivos para la mejora de subrasantes, de los cuales se destaca el de Kodicherla y Nandyala (2019), que mejoraron el índice CBR de una sub-rasante de matriz arcillosa, agregando materiales como la fibra de coco y cenizas volantes, obteniendo un valor de 20% mejor, con respecto a la sub-rasante en su estado natural. Otro estudio comparó la

resistencia de una sub-rasante de un suelo arcilloso estabilizado con: álcali (LAS), escoria granulada de alto horno activada (GGBS), silicato de sodio, residuo de carburo de calcio (CCR), y espuma de aire, obteniendo que el suelo estabilizado con "LAS" tiene una mayor resistencia pero con mayor absorción de agua y mayor resistencia, lo que se atribuye a la presencia de una mayor cantidad de productos de hidratación cementosos en el suelo estabilizado con LAS (Jiang, Du & Liu, 2018).

Rajakumar, Jeyapriya y Meenambal (2018), estudiaron la posibilidad de estabilizar suelos blandos con la utilización de cenizas de carbón y geosintéticos, mostrando que al adicionar el 10% de ceniza de carbón, aumenta la resistencia al corte, así como el contenido óptimo de humedad y la densidad. Asimismo, Ma, Ca y Yuan (2018), utilizaron tres estabilizadores: cenizas volantes, arena y fibra de basalto, donde la mayoría de los tratamientos de mezcla aplicados en este estudio produjeron buenos resultados, asociados con el aumento de la resistencia del suelo expansivo.

El estudio de Singhi, Laskar y Ahmed (2017), se enfocó en determinar la resistencia a la fatiga y el esfuerzo máximo de un suelo arcilloso, estabilizado por la mezcla de escoria y cenizas de escoria con la activación de álcali, donde se comprobó que estos parámetros son mejores por el contenido de escoria. Mahasneh (2016), aplicó otro tipo de materiales para estabilizar suelos arcillosos, como: residuos de aluminio y pavimentos asfálticos reciclados, donde se observó un aumento en la resistencia al corte no confinado, una disminución en el hinchamiento y en el potencial de contracción del suelo arcilloso limoso. Lo anterior demuestra la posibilidad de mezclar materiales, reutilizables o no, con este tipo de suelos, permitiendo mejorar los resultados mecánicos y admisibles en las propiedades físicas.

De otro lado, Proctor, Fehling, Shay, Wittenborn, Avent y Bigham (2005), definen que: "las escorias de acería son desechos generados de la fabricación del acero, cuya materia prima principal es la

chatarra": por cada tonelada de hierro producido, se generan entre 220 kg - 370 kg y 340 kg - 421 kg de escorias (Das, Prakash, Reddy & Misra, 2007). En Colombia se producen aproximadamente 1,2 millones de toneladas de acero anual (Sánchez, 2017), lo cual justifica la búsqueda de alguna aplicación para los subproductos del proceso.

En un estudio referente a la adición de material de escoria de acero, Yadu y Tripathi (2013), evaluaron el potencial de la escoria granulada de alto horno (GBS) para estabilizar un suelo blando; los resultados indicaron que la inclusión de GBS aumenta la resistencia de los suelos blandos. Igualmente, Ashango y Patra (2016), presentan la estabilización del suelo expansivo (C) con escoria de acero (SS), ceniza de cáscara de arroz (RHA) y cal rápida (L); los resultados mostraron que el valor del CBR aumentó, al incrementar los periodos de curación de 7 a 30 días y la rigidez del suelo estabilizado aumentó de 58 a 78%, en comparación con el suelo arcilloso sin estabilizar.

En la investigación de Pilgrene-Mashifana, Ndubisi-Okonta y Ntuli (2018), la estabilización de suelos expansivos con fosfogypsum, cenizas volantes y cenizas volantes con oxígeno básico, mejora las propiedades de ingeniería del suelo. Grubb, Malasavage, Smith y Chrysochoou (2010), estudiaron seis mezclas de material de dragado estabilizado (SDM) que incorporan varias combinaciones de cal, polvo de horno de cemento, alto contenido de álcalis y escorias, y cenizas volantes de clase F. Los autores obtuvieron buenos resultados en cuanto a: resistencia, compresibilidad y volumen, que las hacen favorables para aplicaciones de llenado y mejora de la sub-rasante arcillosa, a costos equivalentes o menores que los materiales de construcción convencionales.

2.2 Metodología

La presente investigación es de tipo experimental cuantitativo. El proyecto se desarrolló en tres fases: caracterización de materiales, plan de dosificación, y ensayos de laboratorio y análisis de resultados.

Los materiales investigados fueron: arcilla tipo caolín, proveniente de las subrasantes típicas de la sabana de Bogotá, y escoria de Acería. A la muestra de arcilla caolinita, se le realizaron los ensayos de: Determinación del Límite Líquido de los suelos, según norma I.N.V. -E – 125 – 13 (INVIAS, 2019), y Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos, según norma I.N.V. -E – 126 – 13 (INVIAS, 2019), para determinar su comportamiento mecánico.

Las propiedades físicas y químicas del material de escoria de acería, fueron brindadas por la Empresa Acerías Paz de Río, quienes suministraron las muestras para realizar la presente investigación. No obstante, se hicieron los siguientes ensayos: Gravedad Específica / Absorción (3/4" -3/8" – N°4 – N°40 – N°200), según norma AASHTO 85-91; Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menores de 0,0375 m (11/2"), por medio de la

Máquina de los Ángeles, según norma I.N.V. – E -218 -13; determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato MICRO-DEVAL, según norma I.N.V. – E -238 -13; Evaluación de la resistencia mecánica de los agregados gruesos por el método de 10% de Finos, según norma I.N.V. – E -227 -13; y Porcentaje de caras fracturadas en los agregados, según norma I.N.V. – E -224 -13.

El plan de dosificación consistió en planificar el reemplazo y distribución de la escoria de acería dentro del suelo arcilloso, en cada uno de los tamices analizados. El comportamiento de la mezcla de escoria de acería con arcilla caolinita, ver figura 1, se estableció con una matriz de dosificación de aumento gradual, en porcentajes de: 25, 50 y 75%, a través del tamiz N°4.



Figura 1. Trituración de Escoria de Acería por Tamizado.

En la tabla 1, se indican los ensayos de laboratorio previstos en la primera fase. Una vez conocido los pesos retenidos en cada uno de los tamices analizados, se procedió a reemplazar la escoria de acería en los porcentajes establecidos. Se realizó la preparación de las probetas de ensayo, en las

dosificaciones de: 25, 50 y 75%, con respecto a la escoria de acero. Luego, a partir del trabajo de Ashango y Patra (2016), se determinó un tiempo de maduración de 14 días, y se procedió a la realización de los ensayos de compresión confinada.

Tabla 1. Ensayos para Determinar el comportamiento mecánico de la Mexccla bajo estudio.

| Ensayo | Norma del Ensayo |
|--|----------------------|
| Relación de Humedad – Masa Unitaria Seca en los Suelos) | I.N.V. -E – 142 – 13 |
| Relación de Soporte del Suelo en el Laboratorio (CBR de Laboratorio) | I.N.V. -E – 148 – 13 |
| Compresión Inconfinada en Muestras de Suelo | I.N.V. -E – 152 – 13 |

Posteriormente, se realizaron los ensayos para obtener el índice CBR de las muestras, índice principalmente usado como parámetro que indica la calidad de una sub-rasante en una estructura de pavimento. Esto se efectuó para cada una de las muestras adicionadas con escoria, y fueron comparadas partiendo de los resultados obtenidos de la muestra sin adición de escoria, para determinar su comportamiento. También se realizaron pruebas de densidad seca, esto con la finalidad de verificar sus características correspondientes con la Base Granular (BG-38) según referencia de especificaciones técnicas en el artículo 230 de las especificaciones para vías del INVIAS (2013). En cuanto a los ensayos efectuados, fueron de dos tipos: compresión confinada (Material fino (“caolín”), y CBR (material fino “caolín”). En el primer caso, los porcentajes a adicionar fueron: 0, 25, 50 y 75%; mientras que en el segundo caso fueron: 25, 50 y 75%.

3. Resultados y discusión

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en los ensayos realizados y las comparaciones entre la muestra patrón y las muestras con sustitución de escoria de acero.

3.1 Pruebas de caracterización

Para la muestra de Caolinita, se obtuvo: límite líquido 40,7%, límite plástico 25,1% e índice de plasticidad 15,5%. La cantidad de escoria usada para mezclar con la arcilla caolinita, fue la retenida entre los tamices N°10 y N°100, que se considera como material fino. Luego se determinó el peso que se reemplazó en escoria de acería en cada porcentaje, quedando la matriz de dosificación como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de dosificación.

| Dosificación (%) | Peso Muestra (gr) | Peso Caolín (gr) | Peso Escoria(gr) |
|------------------|-------------------|------------------|------------------|
| 0 | 2390 | 2390 | 0 |
| 25 | 2331 | 1748,25 | 582,75 |
| 50 | 2526 | 1263 | 1263 |
| 75 | 2462 | 615,5 | 1846,5 |

Con este plan de dosificación, se hizo la comparación de resultados para determinar el comportamiento de la escoria de acería al ser adicionada con la arcilla caolinita. La humedad óptima de

compactación y la densidad seca máxima de la caolinita, se determinaron aplicando el ensayo de la norma INV - E -142 “Proctor modificado” (INVIAS, 2019), cuyos resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados Humedad Óptima de Compactación y Densidad Seca- arcilla Caolinita.

| Prueba N° | 1 | 2 | 3 |
|-------------------------------------|------|------|------|
| Densidad Seca (gr/cm ³) | 1,46 | 1,56 | 1,37 |
| Humedad Optima (%) | 11,9 | 16,5 | 31 |

Una vez obtenidos los porcentajes de compactación y densidades, para tres humedades diferentes, se graficaron en la figura 2. En ella se determinó que la Humedad óptima de compactación de la muestra patrón, fue de 20,2% y la densidad máxima seca, fue de 1,59 gr/cm³.

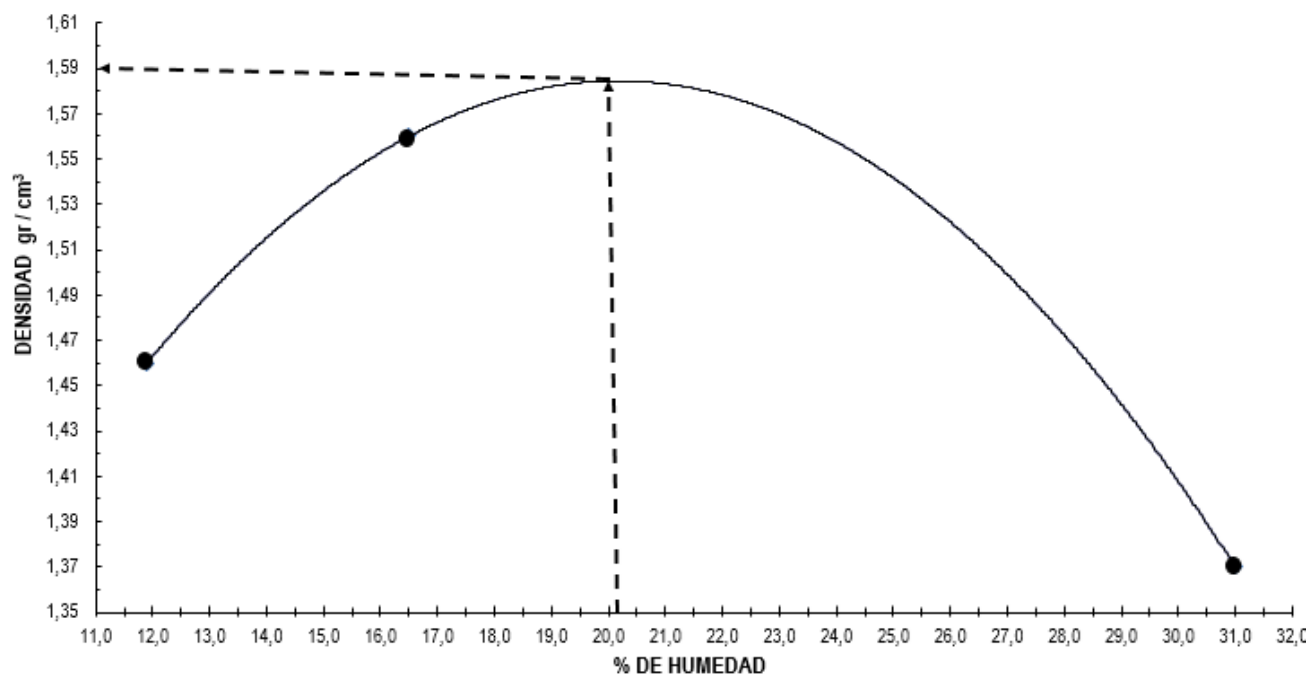


Figura 2. Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima – muestra Caolinita.

Con el ensayo de CBR, se determinó la resistencia inicial al corte de la muestra patrón de la caolinita, la cual fue el punto de partida en el análisis de resultados, al compararlo con mezcla de escoria

de acería en distintos porcentajes (INVIAS, 2013). En la Tabla 4, se muestra la relación esfuerzo deformación del ensayo CBR, obtenido en el laboratorio.

Tabla 4. Relaciones de esfuerzo deformación en el ensayo CBR – Muestra de Caolinita.

| Molde No. | 1 | 2 | 3 |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| Número de Golpes Capa | 56 | 25 | 10 |
| CBR Corregido 0,1" | 7,97 | 1,1 | 0,3 |
| CBR Corregido 0,2" | 10,00 | 2,4 | 1,1 |
| Humedad de penetración (%) | 24,20 | 25,80 | 26,50 |

En la Tabla 5, se indican los valores obtenidos en laboratorio de esfuerzo vs. Deformación, de la muestra de Caolín.

Tabla 5. Esfuerzo vs. Deformación - Muestra Caolinita.

| Lectura Deformación x 10 ⁻³ | Deformación Unitaria Axial % |
|---|------------------------------------|
| 10 | 0,13 |
| 20 | 0,27 |
| 30 | 0,4 |
| 40 | 0,53 |
| 50 | 0,66 |
| 60 | 0,8 |
| 70 | 0,93 |
| 80 | 1,06 |
| 90 | 1,2 |
| 100 | 1,33 |
| 120 | 1,6 |
| 140 | 1,86 |
| 160 | 2,13 |
| 180 | 2,39 |
| 200 | 2,66 |

En la figura 3, la resistencia del suelo o esfuerzo de compresión último, corresponde a 0,417 MPa:

según la clasificación de Terzaghi (1956), es una arcilla de consistencia muy blanda.

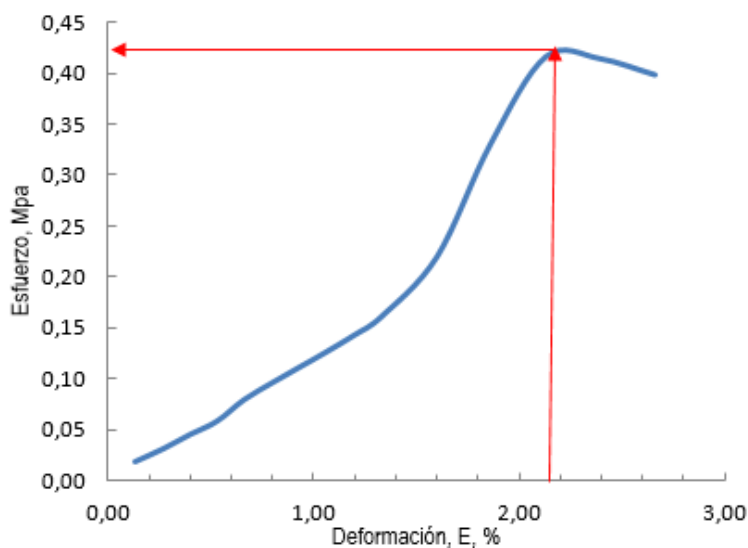


Figura 3. Compresión inconfiada.

En la Tabla 6, se relaciona el resumen de los resultados obtenidos de: humedad óptima, CBR de

laboratorio, densidad seca y compresión inconfiada, para la matriz de Caolinita.

Tabla 6. Resultados Matriz de Dosificación – Muestra Caolinita.

| Dosificación | Humedad Óptima (%) | CBR de Laboratorio (%) | Densidad Seca (Kg/m ³) | Compresión Inconfinada (MPa) | Resistencia al corte (MPa) | Índice de Plasticidad (%) |
|-----------------------|--------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Muestra Patrón | 20.20 | 7.97 | 0,159 | 0.41 | 0.20 | 15.50 |
| 25% | 20.50 | 9.13 | 0,164 | 0.33 | 0.16 | 11.60 |
| 50% | 14.30 | 18.57 | 0,168 | 0.31 | 0.15 | 5.80 |
| 75% | 10.80 | 30.20 | 0,155 | 0.21 | 0.10 | 0.00 |

La caracterización de la escoria de acería, fue suministrada por la siderúrgica Acerías Paz de Río, y sus resultados fueron comparados con los requisitos

para bases granulares del INVIAS, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Cumplimiento de las especificaciones para la construcción de carreteras, INVIAS Art. 231.

| ENSAYO | RESULTADOS LABORATORIO | NORMA INVIAS | CUMPLE |
|--|------------------------|--------------|--------|
| Abrasión en los Ángeles Machine, 500 rpm | 49,20% | 40% (Max) | NO |
| Micro – Deval | 29,20% | 30% (Max) | SI |
| 10% de finos (resistencia seca) | 123 kN | 70 (Min) | SI |
| Índice de plasticidad | No Plástico | 3 (Max) | SI |

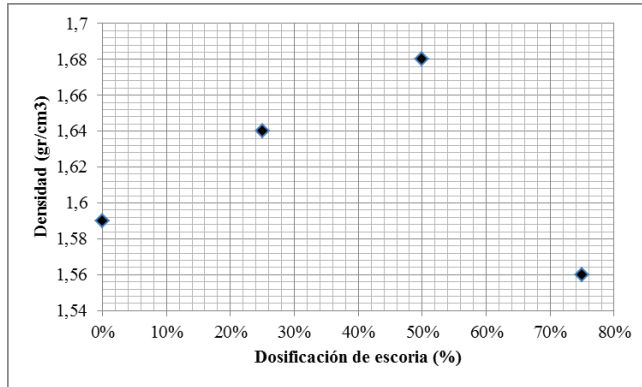
De acuerdo con los parámetros de la Tabla 7, se puede considerar que la escoria de Acería tiene propiedades mecánicas que la clasifican como una base granular, mejor que una subrasante; sin embargo, el único parámetro que no se cumple es la resistencia al desgaste, lo que indica que la escoria utilizada en esta investigación, no es lo suficientemente dura y no presentaría buenos resultados al ser sometida a fricción.

En la Figura 4a, se detalla que la densidad al dosificar escoria de acería aumenta en 25% y 50%, mientras que al dosificar al 75%, la densidad disminuye. En la Figura 4b, se observa que la humedad es inversamente proporcional, a medida que se aumenta la dosificación de escoria, disminuye la cantidad de agua necesaria para obtener la humedad óptima. En la Figura 5a, se observa que la resistencia al corte de las muestras analizadas, aumenta a medida que se incrementa la dosificación de escoria de acería.

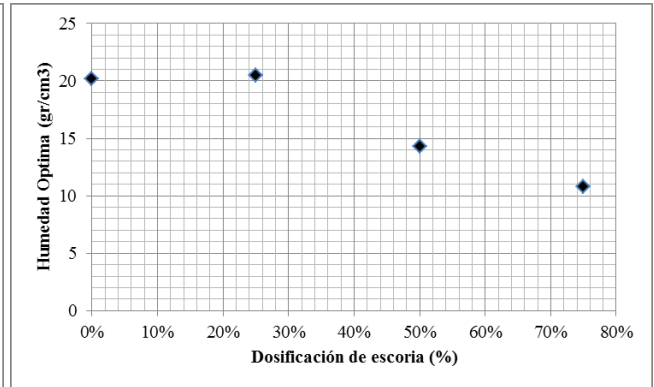
En la Figura 5b, se observa que la resistencia del suelo o esfuerzo de compresión último, disminuye

a medida que se aumenta la dosificación de escoria de acería, debido a que la consistencia de la arcilla caolinita es muy blanda y a que el índice de plasticidad se hace no plástico. La composición de la escoria de Acería analizada, está formada por silicatos cálcicos que presentan porosidad y se hidratan al estar en contacto con el agua.

En la Figura 6a, se observa que el esfuerzo total en la arcilla caolinita es inversamente proporcional a la dosificación de escoria. Es decir, a medida que se aumenta la dosificación disminuyen los esfuerzos; además, disminuye la cohesión entre partículas o resistencia al corte bajo presión. En la figura 6b, la matriz de dosificación de escoria de acería y arcilla caolín, es inversamente proporcional. Es decir, a medida que se aumenta la dosificación de escoria, disminuye el índice de plasticidad y se comporta la matriz como no plástica. Esto se debe a que la composición de la escoria de acería de Paz de Río, está constituida por silicatos cálcicos que presentan porosidad y se absorben al estar en contacto con el agua.

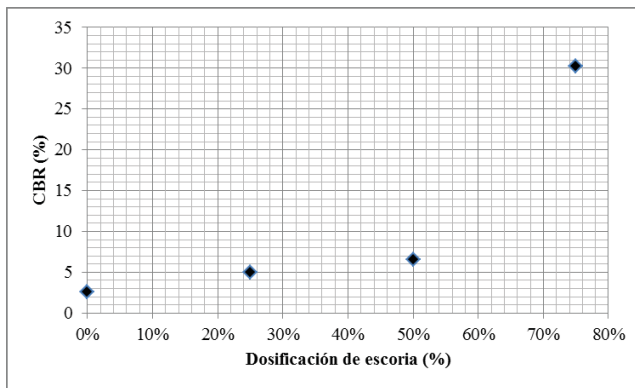


a)

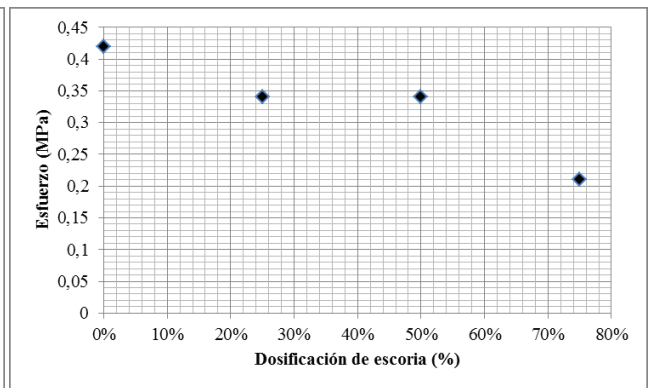


b)

Figura 4. A) Dosificación de escoria vs. Densidad seca máxima. **B)** Dosificación de escoria vs. Humedad Óptima.



a)



b)

Figura 5. A) Dosificación de escoria vs. CBR. **B)** Dosificación de escoria vs. Humedad Óptima.

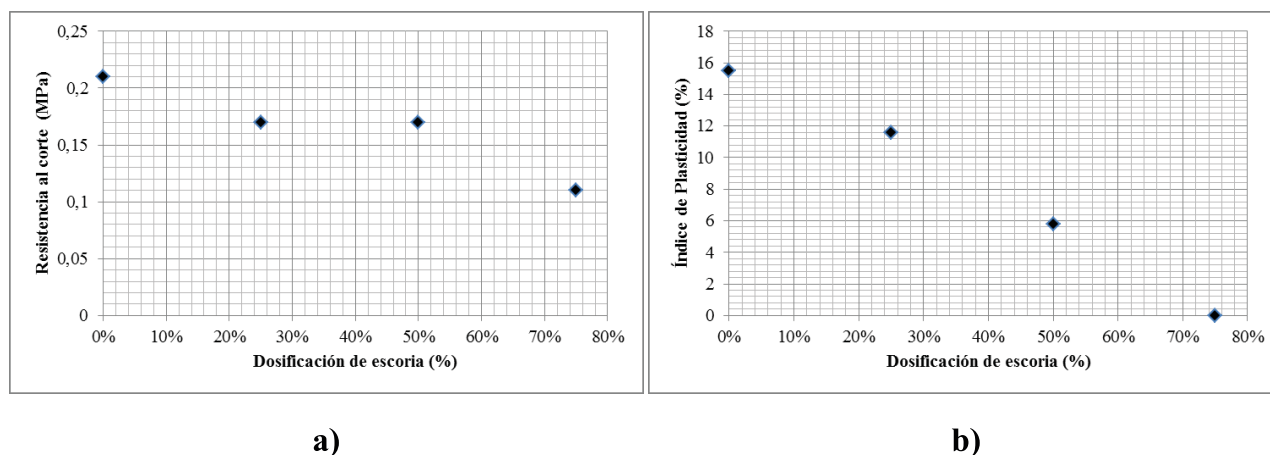


Figura 6. a) Dosificación de escoria vs. Resistencia al corte. **B)** Dosificación de escoria vs. Índice de plasticidad.

3.2 Discusión

Como se observa en la tabla 6, para la muestra de arcilla caolín sin adiciones, los resultados se asemejan a una subrasante típica de las vías de Colombia, con altos porcentajes de plasticidad y bajo CBR. En este sentido, el suelo presenta: sensibilidad a la humedad, cambios de volumen y baja resistencia, ocasionando daños graves en la estructura de las vías.

En la muestra de arcilla caolinita, se observa que la humedad óptima disminuye a medida que se aumenta la dosificación de escoria. Esto se debe a la reducción del índice de plasticidad que sufre la mezcla, hasta convertirla en no plástica, ver tabla 6. La reducción de plasticidad se debe a la composición de óxido de calcio o cal que presenta la escoria, que hace que funcione como material estabilizante. Así mismo, en la tabla 6 se observa que las densidades secas en la muestra de arcilla caolinita, se incrementan al aumentar las dosificaciones en: 25 y 50%, mientras que disminuye en el 75%, con respecto a la muestra patrón de caolín.

En la arcilla caolinita, al momento de compactar las muestras, estas se acomodan en los poros de la escoria reduciendo el porcentaje de vacíos. En los resultados de laboratorio de CBR, tabla 6, se detalla el aumento de los valores de CBR cuando

se incrementa la dosificación de escoria. Esto se debe a la propiedad que tiene la escoria de ser un material cementante, que al ser mezclado con un suelo arcilloso, lo estabiliza, incrementando sus propiedades mecánicas, tales como: el índice de resistencia y densidad seca.

Asimismo, la escoria tiene propiedades cementantes, debido a su composición mineralógica y química (tabla 4), convirtiéndola en una opción de material estabilizante para materiales arcillosos; sin embargo, la escoria no cumple con el parámetro de desgaste y abrasión, según lo estipulado por el INVIAS (2013), debido a que es un material frágil y de baja resistencia a la fricción. En consecuencia, no se puede implementar sin mezclar con un agregado pétreo que disminuya el porcentaje de desgaste (Méndez, 2012).

4. Conclusiones

Los resultados permiten concluir que la escoria de acería funciona en materiales cohesivos, reduciendo la plasticidad hasta un 0% y aumentando el valor del CBR, en un 378.92%. Esto se debe a la buena adherencia entre los dos materiales. En la composición química de la escoria empleada, se observa que está formada por dióxido de silicio (SiO_2), y óxido de calcio (CaO), que son materiales estabilizantes. Estos elementos reaccionan ante

la presencia de agua, generando una reacción expansiva debido a la hidratación, lo que ocasiona la mejora de la sub-rasante.

Sin embargo, la resistencia a la compresión de la mezcla de arcilla caolín y la escoria de acero, disminuye a medida que se aumenta la cantidad de escoria. Esto se podría deber a que la escoria aumenta la plasticidad de la arcilla, y al volver la mezcla más plástica, su resistencia a la compresión disminuye. No obstante, la mezcla soportará más cambios volumétricos por efecto de la plasticidad, razón por la cual mejora el índice CBR. Igualmente, la escoria de acero por sí sola, no cumple para ser un material de sub-rasante, debido a su baja resistencia al desgaste. No obstante, se complementa adecuadamente con la arcilla caolinita, al tener esta un bajo índice CBR.

Se concluye que la escoria de acero es un excelente complemento para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de una sub-rasante de arcilla caolinita. En una primera aproximación, la dosificación más recomendada es de un 25%, debido a que la disminución en la resistencia a la compresión e índice de plasticidad no fue tan alta como en las otras dosificaciones, pero sí aumenta el índice CBR y la densidad.

Agradecimientos

Los autores de este artículo dan crédito a la Universidad Militar Nueva Granada, por el apoyo recibido en el desarrollo de esta investigación.

Referencias

Ashango, A., & Patra, N. (2016). Behavior of Expansive Soil Treated with Steel Slag, Rice Husk Ash, and Lime. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (7). doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001547](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001547)

Das, B., Prakash, S., Reddy, P. S., & Misra, V. N. (2007). An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*.

50 (1), 40-57. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.008>

Dhar, S., & Hussain, M. (2019). The strength and microstructural behavior of lime stabilized subgrade soil in road construction. *International Journal of Geotechnical Engineering*. doi: <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1598623>

Grubb, D., Malasavage, N., Smith, C., & Chrysochoou, M. (2010). Stabilized Dredged Material. II: Geomechanical Behavior. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136 (8). Recuperado de: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000290>

Instituto Nacional de Vías, INVIAS. (2013). Relaciones de humedad - Peso Unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación) INVE-142-13. Bogotá, Colombia.

Instituto Nacional de Vías, INVIAS. (2019). Documentos técnicos. Recuperado de: <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos>

Instituto Nacional de Vías, INVIAS. (2013). Mejora-miento de la subrasante con adición de materiales. Bogotá, Colombia.

Jiang, N.-J., Du, Y.-J., & Liu, K. (2018). Durability of lightweight alkali-activated ground granulated blast furnace slag (GGBS) stabilized clayey soils subjected to sulfate attack. *Applied Clay Science*, 161 (1), 70-75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.014>

Kodicherla, S., & Nandyala, D. (2019). Influence of randomly mixed coir fibres and fly ash on stabilization of clayey subgrade. *International Journal of Geo-Engineering*, 10 (1). doi: <https://doi.org/10.1186/s40703-019-0099-1>

Ma, Q.-Y., Cao, Z.-M., & Yuan, P. (2018). Experimental Research on Microstructure and Physical-Mechanical Properties of Expansive Soil Stabilized with Fly Ash, Sand, and Basalt Fiber. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2-13. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/9125127>

Mahasneh, B. (2016). Use of Aluminum Residue and Recycled Asphalt Pavement Materials to

Stabilize Silty Clay Soil. *Journal of Infrastructure Systems*, 22 (4). doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000250](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000250)

Méndez, A. (2012). *Proyecto sobre residuos: Utilización de escorias como sustitutos de áridos* (Tesis de maestría). Escuela de Organización Industrial, España. Recuperado de: <https://www.eoi.es/es/file/16052/download?token=IUlvu2yy>. Obtenido de Trabajo de Grado de Maestría. Escuela de Organización Industrial, España: <https://www.eoi.es/es/file/16052/download?token=IUlvu2yy>

Moreno-Anselmi, L. A., Reyes-Ortiz, Ó. J., & Ruíz-Acero, J. C. (2016). Evaluación del comportamiento mecánico de asfalto natural a partir de muestras a temperatura ambiente provenientes de Caquetá, Colombia. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 6 (2), 145–154. doi: <http://doi.org/10.19053/20278306.3115>

Ospina-García, M. Á., Moreno-Anselmi, L. Á., & Rodríguez-Polo, K. A. (2017). Análisis técnico económico del uso de concreto reciclado y el concreto convencional en Colombia. *Desarrollo e innovación en ingeniería*. Medellín, Colombia: Instituto antioqueño de investigación.

Ospina-García, M. Á., Moreno-Anselmi, L. Á., Sánchez-Saldana, J. R., & Chaves-Pabón, S. B. (2018). Mechanical Behavior of Masonry Concrete Units Made with Rubbish Proceeded From the Demolition of Buildings Constructed with Common Bricks. *International Journal of Applied Engineering*, 13 (23), 16447 - 16460.

Pilgrene-Mashifana, T., Ndubisi-Okonta, F., & Ntuli, F. (2018). Geotechnical Properties and Microstructure of Lime-Fly Ash-Phosphogypsum-Stabilized Soil. *Advances in Civil Engineering*, 2018.

Proctor, D. M., Fehling, K. A., Shay, E. C., Wittenborn, J. L., Avent, C., & Bigam, R. D. (2005). *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. New York: Cambridge University Press.

Radhakrishnan, G., & Anjan Kumar, M. R. (2019). Estudio modelo sobre las respuestas de carga cíclica del sistema de pavimento flexible establecido en el

subrasante expansivo. En T. T., Técnicas de mejora de suelos y geosintéticos. *Notas de la conferencia en Ingeniería Civil*, 14). Singapur: Springer.

Rajakumar, C., Jeyapriya, S., & Meenambal, T. (2018). Characterization and effective utilization of coal ash with geosynthetics in pavement subgrade. *Indian Journal of Environmental Protection*, 38, (3), 234-238. Recuperado de: <http://ijep.co.in/uploads/journals/15210431621433.pdf>

Rondón-Quintana, H., & Reyes-Lizcano, F. A. (2015). Pavimentos: materiales, construcción y diseño. Bogotá, Colombia.

Rondón-Quintana, H., Zafra-Mejía, J., & Chaves-Pabón, S. (2018). Behavior of a Hot Mix Asphalt using Blast Furnace Slag and Gilsonite. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13, (22), 15567-15573. doi: https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n22_17.pdf

Rondón-Quintana, H., Hernández-Noguera, J., & Urazán-Bonells, C. (2016). Behavior of Gilsonite-Modified Hot Mix Asphalt by Wet and Dry Processes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (02). doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001339](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001339)

Sánchez, H. (2017). Estado del Arte sobre las Escorias Negras de Horno de Arco Eléctrico y sus Aplicaciones en Pavimentos. *Lesprit Ingenieur*, 7 (1). Recuperado de: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieur/article/view/1367>

Singhi, B., Laskar, A., & Ahmed, M. (2017). Mechanical Behavior and Sulfate Resistance of Alkali Activated Stabilized Clayey Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35 (5), 1907-1920. doi: <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0216-x>

Terzaghi, K. (1956). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley/Chapman & Hall; Edición: 9th Printing.

Yadu, L., & R.K.Tripathi. (2013). Effects of Granulated Blast Furnace Slag in the Engineering Behaviour of Stabilized Soft Soil. *Procedia Engineering*, 53, 125-131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.019>