

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**



**Utilización de la escoria siderúrgica para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de subrasantes en suelos arcillosos**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE BACHILLER EN INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**

**AUTOR**

**Jhamir Alessander Llatas Contreras**

**ASESOR**

**Angel Antonio Ruiz Pico**

<https://orcid.org/0000-0003-2638-0593>

**Chiclayo, 2023**

## Trabajo de Investigación\_LLATAS CONTRERAS JHAMIR

### INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>20%</b>	<b>19%</b>	<b>5%</b>	<b>8%</b>
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

### FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>8%</b>
<b>2</b>	<b>repositorio.ucv.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>3</b>	<b>Submitted to Universidad Cesar Vallejo</b> Trabajo del estudiante	<b>2%</b>
<b>4</b>	<b>Submitted to Universidad Continental</b> Trabajo del estudiante	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>es.slideshare.net</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>www.researchgate.net</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>7</b>	<b>tesis.usat.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>8</b>	<b>www.nrcresearchpress.com</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>9</b>	<b>es.scribd.com</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>

## Índice

<b>Resumen .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>5</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>6</b>
<b>Materiales y métodos .....</b>	<b>8</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>10</b>
<b>Discusión .....</b>	<b>15</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>18</b>
<b>Agradecimiento.....</b>	<b>19</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>19</b>

## Resumen

En el mundo, anualmente se generan grandes cantidades de escorias derivadas del acero. Algunas escorias procedentes de la fabricación de acero se reutilizan en la generación de otros materiales, como agregado de asfalto en mezcla caliente, relleno de tuberías, concreto, entre otros. Las investigaciones están dirigidas a enriquecer las características mecánicas de los suelos y minimizar los costes de construcción de vías. La presente investigación pretende encontrar un material que aumente las propiedades mecánicas subrasantes en suelos arcillosos con diferentes índices de plasticidad usando Escorias de Horno de Arco Eléctrico (EAF) en porcentajes: 5%, 15% y 25% del peso de suelo. A partir de los ensayos realizados en las muestras de suelo utilizando parámetros se pudo clasificar mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y también por American Association Standards Highway Transportation Officials (AASHTO) como arcillas de baja y alta plasticidad. Al ensayar las muestras patrón y las muestras con EAF, se obtuvieron resultados que evidenciaron una mejora en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos con la adición de EAF, aumentando los valores de la Capacidad de Resistencia a la Penetración (CBR) y la máxima densidad seca del suelo arcilloso según se incrementó el porcentaje de EAF en la mezcla. El óptimo contenido de adición de EAF corresponde al 25% del peso de suelo.

**Palabras clave:** suelos arcillosos, escorias horno arco eléctrico, subrasantes, estabilización, CBR, máxima densidad seca

### **Abstract**

In the world, large amounts of steel slag are generated annually. Some slag derived from steel production is reused in the generation of other materials, such as asphalt aggregate in hot mix, pipe backfill, concrete, among others. Research is aimed at enhancing the mechanical properties of soils and minimizing road construction costs. This study aims to find a material that enhances the subgrade mechanical properties in clayey soils with different plasticity indexes using Electric Arc Furnace (EAF) slag at percentages of 5%, 15%, and 25% by weight of soil. Based on the tests conducted on soil samples using parameters, they were classified using the Unified Soil Classification System (USCS) and the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) as low and high plasticity clays. When testing the standard samples and the samples with EAF, results showed an improvement in the physical and mechanical properties of clayey soils with the addition of EAF, increasing the values of California Bearing Ratio (CBR) and the maximum dry density of the clayey soil as the percentage of EAF in the mixture increased. The optimum content of EAF addition corresponds to 25% by weight of soil.

**Keywords:** clayey soils, electric arc furnace slag, subgrades, stabilization, CBR (California Bearing Ratio), maximum dry density

## Introducción

Se ha producido a nivel global más de 1.951 millones de toneladas de acero crudo este 2021 [28]. La fabricación de este producto genera un residuo denominado “escoria” que provoca problemas ambientales [9], debido a las limitaciones en el reciclaje [30].

En estas últimas dos décadas, ha habido un crecimiento del interés por el empleo de nuevos materiales en la industria de la construcción (Rondon et al.,2018). Por ello, se han hecho diversos estudios sobre el uso de residuos industriales en aplicaciones civiles como opción de materiales de construcción que pueden llegar a ser menos costosos y respetuosos con el medio ambiente a la vez que mejoran las propiedades físicas y mecánicas del resultado final [21]. Estos residuos pueden ser utilizados como reemplazo para la mejora del suelo y subrasante de pavimento de carreteras [21].

La subrasante está conformada, normalmente por suelo natural, como arcillas expansivas. El material arcilloso tiene características que pueden ser negativas en el momento de la construcción, como: alto potencial de expansión y contracción, baja capacidad de carga y, por último, alta compresibilidad; poniendo en gran riesgo a la edad y el rendimiento de la estructura del pavimento [24]. Por tanto, es importante realizar mejoramientos a este tipo de suelos, ya sea con la incorporación de materiales convencionales o reutilizables (Shriful et al.,2022).

La estabilización de suelos problemáticos con los subproductos reutilizables uno de los procedimientos más utilizados para el enriquecimiento de las características físicas y mecánicas [27]. Con ello se ha incrementado la capacidad de carga, aumentando la resistencia mecánica del suelo, compresibilidad, durabilidad y plasticidad del suelo arcilloso [22]. Como material reutilizable industrial, se han planteado muchas alternativas, desde cenizas volátiles, limo, lodo rojo [22]; hasta escorias siderúrgicas, siendo esta última el objeto de estudio para la estabilización de la presenta investigación. La reutilización de estas escorias ayudaría en la eliminación de estos residuos y en la disminución del uso excesivo de recursos naturales [9]. Para Shalabi et al (2016), al emplear diferentes porcentajes de escoria de acero agregada (0%, 15% y 30%), muestran que, al aumentar el contenido de acero en los suelos arcillosos, aumenta su valor de CBR y disminuye el hinchamiento libre.

Este trabajo es realizado con el objetivo de utilizar la escoria siderúrgica a porcentajes de 5%, 15% y 25% en función del peso del suelo, para mejorar las propiedades mecánicas de las subrasantes en suelos arcillosos con diferentes índices de plasticidad. Para ello, se realizarán ensayos de laboratorio como es el Proctor Modificado y CBR a tres distintas muestras de suelos

arcillosos del distrito de Chiclayo, en Perú. Asimismo, se determinará la máxima densidad seca (MDS) y capacidad resistente como subrasante (CBR) de los tres tipos de suelo patrón y luego, al suelo con las adiciones a distintos porcentajes.

## Materiales y métodos

### Fase 1. Características de EAF

Para la investigación, se tuvo que conseguir las muestras de los desechos de industria siderúrgica. Las escorias proceden de la empresa siderúrgica SIDERPERÚ. El tipo material utilizado fue la Escoria Horno Arco Eléctrico (EAF). Eventualmente, se obtuvo cuatro sacos de este material, con un total de 30 kilos cada una.



*Figura 1. Escoria de acero de SIDERPERU.*

- **Composición química del EAF**

Los componentes químicos de la escoria son afectados por diversos factores, tales como la clase de material (chatarra) que se funde, procesos de manejo de las variables de operación y la tasa de enfriamiento. (Guevara, 2022). La Tabla 1 muestra los porcentajes de los distintos componentes químicos presentes en las escorias de SIDERPERU.

Tipo de escoria	%Óxidos		%Metales	
Over, A, B, C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.52	As	0.00089
	CaO	21.58	Cd	0.00005
	FeO	30.40	Cr	0.11
	MnO	6.14	Hg	0.00027
	MgO	10.62	Pb	0.009
	SiO <sub>2</sub>	15.81	Zn	0.03
Fino	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.04	-	-
	CaO	29.60	-	-
	FeO	20.10	-	-
	MnO	4.53	-	-
	MgO	10.50	-	-
	SiO <sub>2</sub>	15.05	-	-

*Tabla 1. Composición química de la escoria de acería (SIDERPERÚ, 2019)*

## Fase 2. Recogida de muestras de suelo arcilloso

Se extrajeron las muestras de suelo arcilloso a partir de la excavación de 3 calicatas. A estas se les denomina «Muestra patrón». La excavación fue hecha a 1.50m de profundidad. Se obtuvo de cada calicata tres sacos de suelo de aproximadamente 80 kilos cada uno.

## Fase 3. Características de las mezclas en laboratorio

Se extrajeron las muestras de suelo arcilloso a partir de la excavación de 3 calicatas. A estas se les denomina «Muestra patrón». La excavación fue hecha a 1.50m de profundidad. Se obtuvo de cada calicata tres sacos de suelo de aproximadamente 80 kilos cada uno.

### • Propiedades físicas de la muestra patrón

Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio para determinar las características físicas de las tres muestras patrón. Estos se llevaron a cabo en la Universidad Santo Toribio de Mogrovejo. Dentro de este, se determinaron lo siguiente: análisis granulométrico, contenido de humedad, límites de Atterberg; y con estos datos, determinar el índice de plasticidad de las muestras patrón. Todo hallado según MTC E 109 del Manual de Ensayo de Materiales del MTC.

- a) Primero, se determinó el contenido de humedad.
- b) Después, se realizó un análisis granulométrico, con ello se determinaría qué clase de suelo mediante el SUCS y el AASHTO.
- c) Además, se determinaron los límites de Atterberg sirvieron para hallar el LL y LP.
- d) Se halló el LP mediante la extracción de una pequeña porción del recipiente homogeneizado anteriormente.



**Figura 2.** Barras de 3.2mm de espesor para determinar el LP de las muestras de suelo arcilloso

- e) Después de hallar los valores de LL y LP de cada una de las muestras, se realizó el cálculo del Índice de Plasticidad, empleando la siguiente fórmula descrita por el MTC (2016).

$$IP=LL-LP$$

- **Propiedades mecánicas de la muestra patrón**

A fin de evaluar las propiedades mecánicas de las muestras, se llevaron a cabo los ensayos de Proctor Modificado y CBR, los cuales se realizaron siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

a) Se pesó un total de 5000 gramos el suelo de cada una de las muestras extraídas (C-1, C-2, C-3), también se pesó las escorias de Horno Arco Eléctrico (EAF) que se va a adicionar en los porcentajes de 5%, 15% y 25%, ambos materiales se colocaron juntos en una bolsa hermética para almacenarlos hasta el momento de la realización de los ensayos.

b) Mediante el ensayo de Proctor modificado se determinó la MDS y el óptimo contenido de humedad de las 3 muestras sin adición y con adición de escorias. El método empleado en este ensayo fue el método A como lo indica el Manual de Ensayo de Materiales del MTC, debido a que el material de cada una de las muestras pasó el tamiz N°4 y no hubo retención, pasando a utilizar el molde con un diámetro de 4 pulgadas con un total de 25 golpes por capa.

c) Para hacer el ensayo del CBR y determinar la capacidad resistente del suelo como subrasante, se tuvo que realizar lo siguiente: la compactación de la muestra arcillosa en los moldes para CBR, la medición de la expansión por un periodo de 4 días de cada una de las muestras sumergidas en el agua. Posteriormente, se llevó a cabo el ensayo de penetración en las muestras patrón y con adición de EAF.

## Resultados

### Suelos arcillosos patrón

Se obtuvieron los resultados de las características físicas de las tres muestras patrón:

Muestras	C-1	C-2	C-3
%Humedad	19.92	20.96	19.71
LL	43.72	51.28	45.13
LP	20.18	22.83	20.47
IP	23.54	28.45	24.66

**Tabla 2.** Resultados de propiedades físicas de las muestras patrón C-1, C-2 y C-3.

También, se clasificaron las muestras de suelo por el Sistema SUCS y AASHTO, como se puede observar en la Tabla 2.

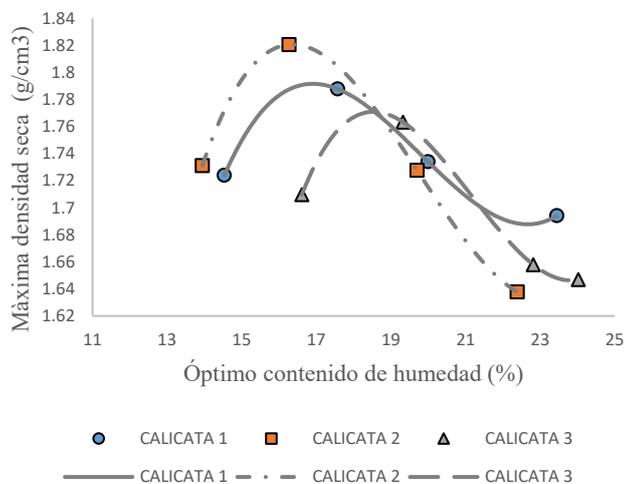
Clasificación SUCS		Clasificación AASHTO		
Símbolo	Composición	Grupo	Calificación	
C-1	CL	Arcilla de baja plasticidad de arena	A-7-6 (14)	Suelo arcilloso de calidad mala
C-2	CH	Arcilla de alta plasticidad con arena	A-7-6 (18)	Suelo arcilloso de calidad mala
C-3	CL	Arcilla de baja plasticidad de arena	A-7-6 (15)	Suelo arcilloso de calidad mala

**Tabla 3.** Clasificación del tipo de suelo mediante los Sistemas SUCS y AASHTO.

En los ensayos para determinar las propiedades mecánicas, se obtuvieron la máxima densidad seca, óptimo contenido de humedad y su capacidad resistente como subrasante (CBR), arrojando los siguientes resultados en la Tabla 3.

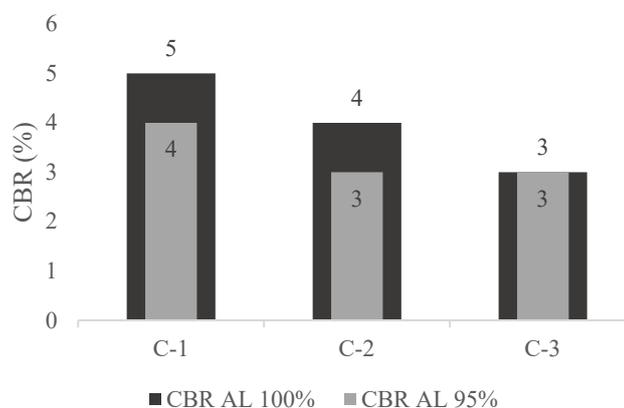
Propiedades	C-1	C-2	C-3	Und
MDS al 95% Óptimo	1.701	1.729	1.682	g/cm <sup>4</sup>
contenido de humedad	17	16.4	18.65	%
CBR al 100% de MDS a 2.54 cm	5	4	3	%
CBR al 95% de MDS a 2.54 cm	4	3	3	%

**Tabla 4.** Resumen de ensayos de propiedades mecánicas de las muestras patrón.



**Figura 3.** Gráfico del Próctor Modificado de las muestras C-1, C-2 y C-3.

En la Figura 3, se muestran las curvas del Próctor Modificado de las 3 calicatas estudiadas como muestra patrón, relacionando la densidad seca con el óptimo contenido de humedad.



**Figura 4.** CBR a 2.54 cm (1 in) de penetración de C-1, C-2 y C-3, muestras patrón.

Para la Figura 4, se pueden comparar los resultados del CBR al 95% y 100% de las tres muestras patrón diferentes.

### Suelos arcillosos con EAF

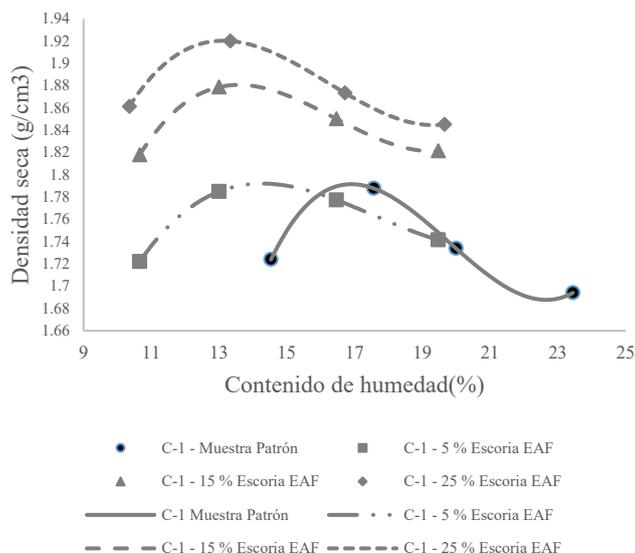
#### a) Máxima densidad seca

Los resultados para obtener la máxima densidad seca con el óptimo contenido de humedad para el grupo experimental adicionando Escorias de Horno Arco Eléctrico en las dosificaciones de 5 %, 15 % y 25 % se muestran a continuación.

Máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad			
Muestras	%Adición de escorias EAF	Máxima Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Óptimo Contenido de Humedad (%)
C-1	5	1.792	14
	15	1.881	13.5
	25	1.921	13.2
C-2	5	1.84	15
	15	1.867	14.1
	25	1.859	14.6
C-3	5	1.786	17.6
	15	1.81	16.2
	25	1.921	13.5

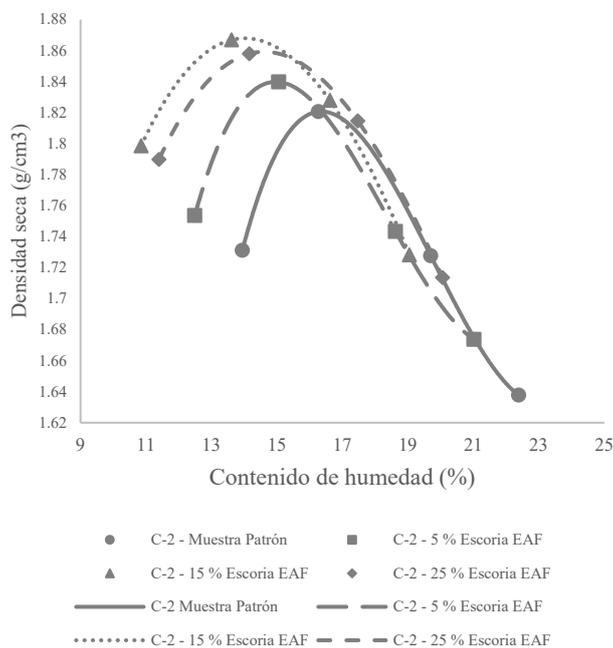
**Tabla 5.** Máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad del grupo experimental de las muestras con adición.

En la Figura 5, se muestra las curvas del Proctor Modificado de la calicata C-1 con adición de Escorias EAF en porcentajes de 5%, 15 y 25%, relacionando la densidad seca con el óptimo contenido de humedad, mostrando también el comportamiento de la muestra patrón C-1.



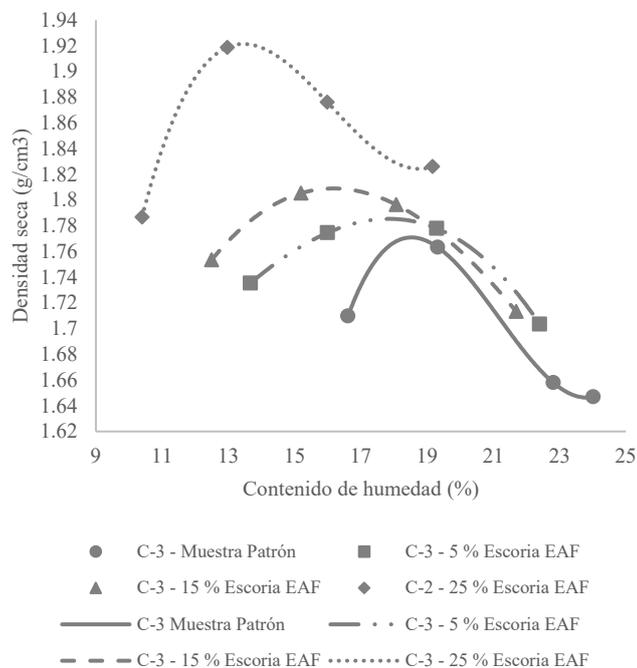
**Figura 5.** Gráfico del Próctor Modificado de la muestra C-1 con adición de escoria siderúrgica.

En Figura 6, se muestra las curvas del Proctor Modificado de la calicata C-2 con adición de Escorias EAF en porcentajes de 5%, 15 y 25%, relacionando la densidad seca con el óptimo contenido de humedad.



**Figura 6.** Gráfico del Próctor Modificado de la muestra C-2 con adición de escoria siderúrgica.

Y, por último, en la Figura 7, se observan las curvas del Proctor Modificado de la calicata C-3 con adición de Escorias EAF en porcentajes de 5%, 15 y 25%, relacionando la densidad seca con el óptimo contenido de humedad.



**Figura 7.** Gráfico del Proctor Modificado de la muestra C-3 con adición de escoria siderúrgica.

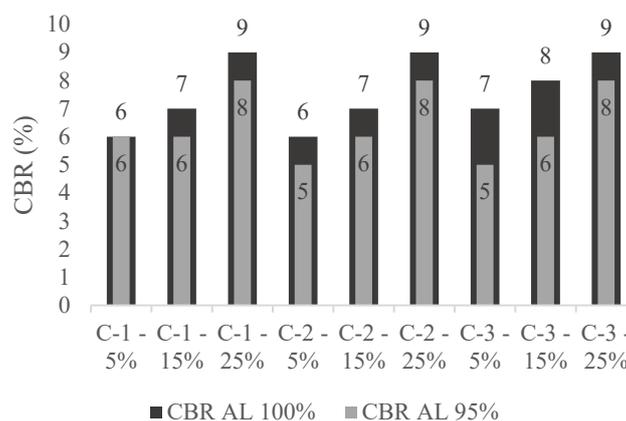
#### b) Capacidad resistente como subrasante mediante CBR

Propiedades	EAF	C-1	C-2	C-3	Und
MDS al 95%	5%	1.702	1.748	1.687	g/cm4
	15%	1.787	1.774	1.72	
	25%	1.825	1.766	1.825	
Óptimo contenido de humedad	5%	14	15	17.6	%
	15%	13.5	14.1	16.2	
	25%	13.2	14.6	13.5	
CBR al 100% de MDS a 2.54 cm	5%	6	6	7	%
	15%	7	7	8	
	25%	9	9	9	
CBR al 95% de MDS a 2.54 cm	5%	6	5	5	%
	15%	6	6	6	
	25%	8	8	8	

**Tabla 6.** Resumen de ensayos de propiedades mecánicas de las muestras.

A partir del ensayo de CBR, se mostraron en la Tabla 6, resultados para las distintas muestras de los suelos arcillosos con la adición del 5%, 15% y 25% de EAF.

Tras los resultados, se pueden comparar los resultados del CBR al 95% y 100% de las tres muestras con los diferentes tipos de %EAF en la Figura 8.



**Figura 8.** CBR a 2.54 cm (1 in) de penetración de C-1, C-2 y C-3 con adición de EAF.

## Discusión

En los resultados, se obtuvo que el contenido de la humedad de las muestras patrón para la C-1, C-2, C-3 fue de 19.92 %, 20.96 %, 19.71 % respectivamente, como se observa en la Tabla 1. Además, habiendo hallado los LL y LP, se determinó el IP de todas las muestras, con resultados de 23.54, 28.45 y 24.66, respectivamente.

Según el MTC (2016), los IP mayores de 20, te indica que existe una plasticidad alta, esta característica lo muestra solo los suelos muy arcillosos. Por ello, es importante la realización de un mejoramiento o estabilización de este tipo de suelos.

Los resultados de la densidad máxima seca (MDS) y el porcentaje óptimo de humedad para las muestras patrón se presentan en la Tabla 4. Se puede observar que la muestra C-1 alcanzó una MDS del 95% de 1.701 g/cm<sup>3</sup> con un contenido de humedad óptimo del 17.0%. En el caso de la muestra C-2, la MDS fue de 1.729 g/cm<sup>3</sup> con un contenido de humedad óptimo del 16.4%. Por último, la muestra C-3 logró una MDS de 1.682 g/cm<sup>3</sup> con un contenido de humedad óptimo del 18.65%.

Por otro lado, en el caso de los suelos arcillosos con la adición de escoria de horno de arco eléctrico (EAF), se observa que la muestra C-1 con una adición del 5% de EAF alcanzó una

máxima densidad seca de 1.792 g/cm<sup>3</sup> con un contenido de humedad óptimo del 14.0%. Asimismo, con una adición del 15% de EAF, se obtuvo una MDS de 1.881 g/cm<sup>3</sup> con un óptimo contenido de humedad del 13.5%, mientras que con una adición del 25% de EAF se logró una MDS de 1.921 g/cm<sup>3</sup> con un óptimo contenido de humedad del 13.2%, según se muestra en la Tabla 6. Si se compara la muestra C-1 patrón con las muestras C-1 con EAF, se puede observar un aumento de la MDS de 1.701g/cm<sup>3</sup> a 1.921g/cm<sup>3</sup> con una adición del 25% de EAF, lo que supone una notable mejora del 13%.

En el caso de la muestra C-2, se observa que con una adición del 5% de EAF se alcanzó una máxima densidad seca de 1.840 g/cm<sup>3</sup> con un contenido de humedad óptimo del 15.0%. Asimismo, con una adición del 15% de EAF se obtuvo una MDS de 1.867 g/cm<sup>3</sup> con un óptimo contenido de humedad del 14.1%, mientras que con una adición del 25% de EAF se logró una MDS de 1.859 g/cm<sup>3</sup> con un óptimo contenido de humedad del 14.6%, según se muestra en la Tabla 6. En comparación con la muestra C-2 patrón, se observa una variación de la densidad máxima seca de 1.729 g/cm<sup>3</sup> a 1.867g/cm<sup>3</sup>, lo que representa una variación del 8%.

En la Tabla 6 también se presentan los resultados correspondientes a la muestra C-3 con la adición de diferentes porcentajes de EAF. Con una adición del 5% de EAF, se alcanzó una máxima densidad seca de 1.876 g/cm<sup>3</sup> con un contenido de humedad óptimo del 17.6%. Asimismo, con una adición del 15% de EAF se obtuvo una MDS de 1.810 g/cm<sup>3</sup> con un óptimo contenido de humedad del 16.2%, mientras que con una adición del 25% de EAF se logró una MDS de 1.921 g/cm<sup>3</sup> con un óptimo contenido de humedad del 13.5%. Es interesante notar que el aumento de la MDS entre la muestra C-1 y C-3 con adición del 25% de EAF es el mismo, y si se compara con la muestra C-3 patrón, se observa un aumento del 14%.

El CBR de las muestras patrón arrojaron resultados, la C-1 para 2.54 cm (1 in.) de penetración se tuvo que el CBR al 100 % es de 5 %, mientras que el CBR al 95 % es de 4 %. Para C-2 para 2.54 cm (1 in.) de penetración se tuvo que el CBR al 100 % es de 4 %, mientras que el CBR al 95 % es de 3 %. Para finalizar, la C-3 para 2.54 cm (1 in.) de penetración se tuvo que el CBR al 100 % es de 6 %, mientras que el CBR al 95 % es de 3 %. En las categorías de subrasante del MTC (2016), se menciona que, si el CBR es menor al 3%, esta subrasante será considerada como inadecuada y cuando esté entre 3% y 6%, será insuficiente. Entonces, las muestras patrón que se tienen en la investigación son inadecuadas e insuficiente para ser utilizada como subrasantes.

Los resultados del CBR al 95% y al 100% para 1 pulgada, de las muestras patrón y las muestras con EAF, se puede observar en las Figura 4 y en la Figura 8. Para la muestra C-1, cuando no tiene adición de EAF, presenta CBR al 100 % es de 5 %, mientras que el CBR al 95

% es de 4 %; cuando se le adiciona %EAF, el que muestra mejores resultados es el de 25% de EAF, con CBR al 100% de 9%, mientras que el CBR al 95% es de 8%. Esta mejoría persiste en las muestras de C-2 y C-3 con adición al 25% de EAF. Para el Manual de Ensayos del MTC (2016), los CBR arrojados con la adición máxima del 25%, están entre 6% y 10%, siendo considerados utilizables para subrasantes regulares. Estos resultados, al ser de suelos arcillosos, mejoran sus condiciones de inadecuado e insuficiente a regulable para ser trabajado.

Para Wu et al (2019) [30], en su investigación con escorias siderúrgicas residuales añadidas al 0%, 3%, 5%, 7% y 10%, en suelos expansivos, indicó que el CBR aumenta a mayor contenido de % de escorias, llegando a un 12% de CBR, con un 10% de escoria siderúrgica añadida; satisfaciendo los requisitos como subbase de carreteras según normas chinas. Shalabi et al (2016) [22] realizó su estudio con adiciones de escoria al 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30% como reemplazo de suelos arcillosos; mostrándole que a medida que aumenta el contenido de escoria de acero, aumenta el valor de CBR.

Es importante mencionar que estas mejorías no solo se dan con adiciones de escorias siderúrgicas añadidas, dado que Tholkamudalige et al (2022) [24] en su investigación añadiendo % de vidrio triturado al 0%, 5%, 10%, 15% y 20% a la subrasante de arcilla, arrojando resultados de CBR al suelo arcilloso inicial del 9.07%. Se observó que el CBR aumentó al agregar vidrio a la arcilla expansiva. Al aumentar el contenido de vidrio del 5% al 15%, el valor de CBR aumentó del 13.6% al 18.1%. Sin embargo, la adición de una mayor cantidad de vidrio (20%) resultó en una reducción del valor de CBR, que disminuyó al 15.8%. A Mujtaba et al. (2020) [28], le ocurre algo similar al usar vidrio, la mezcla de arcilla y polvo de vidrio mostró mejoras tanto en la resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS) como en el índice de soporte de California (CBR) hasta que se alcanzó un contenido de vidrio óptimo del 12%. Sin embargo, cuando se aumentó el contenido de vidrio por encima del 12%, se observó una disminución en los parámetros de UCS y CBR.

Entre otros materiales empleados se encuentra el polvo de horno de cemento empleados por Adeyanju et al (2020) [3], utilizando distintos porcentajes (entre 7.5% y 15%), el cual ha mejorado significativamente la resistencia del suelo. En general, estas mejoras resultaron en una mejora superior al 2500%. El porcentaje más alto de CBR empapado se obtuvo después de la adición del 15%, lo que mejoró el valor de CBR del suelo natural de 0.557 a 16.82%. Los resultados sugieren que el porcentaje óptimo del material en peso seco para obtener la CBR óptima es del 10%.

Los resultados dados por la presente investigación demostraron una mejoría de hasta un 14% en el CBR del suelo arcilloso con 25% de EAF, convirtiendo en apto el suelo para subrasante.

## Conclusiones

Se llevó a cabo una investigación sobre el potencial de la escoria de EAF, un subproducto de la industria siderúrgica, para su uso en la modificación de suelos arcillosos. Se evaluaron las propiedades físicas básicas de las muestras patrón incluyendo el % de humedad y el índice de plasticidad (IP). Además de calcularse las propiedades mecánicas, de la muestra patrón y con adición de EAF, como la Máxima Densidad Seca (MDS), índice de soporte de California (CBR) y el %óptimo de humedad, con el fin de comprender el comportamiento de ingeniería y el mecanismo microestructural de los suelos tratados. A continuación, se presentan los principales resultados de esta investigación.

1. Las muestras patrón de suelo (C-1, C-2 y C-3) se clasificaron por SUCS y AASHTO, demostrando que son considerados como arcilla de baja plasticidad de arena y suelo arcilloso de calidad mala, respectivamente. Además, se determinó que el contenido de humedad en las muestras patrón para C-1, C-2 y C-3 fue de 19.92%, 20.96% y 19.71%, con un índice de plasticidad de 23.54%, 28.45% y 24.66, respectivamente, demostrando ser suelo arcilloso de alta plasticidad.

2. La Máxima Densidad Seca (MDS) de las muestras patrón C-1, C-2 y C-3 tuvieron un incremento de 7.26%, 2.14% y 8.53%, respectivamente, al adicionar 25% de EAF. En cuanto al óptimo contenido de humedad hubo una disminución del 22.35%, 10.98%, 27.61%, respectivamente.

3. La muestra C-1 con 25% de EAF a 2.54 cm (1 in) de penetración, tuvo un valor de CBR al 100% del 9%, mostrando un incremento del 80% con respecto a su muestra patrón C-1, mientras que el CBR al 95% es de 8% con un incremento del 100%.

4. La muestra C-2 con 25% de EAF a 2.54 cm (1 in) de penetración, tuvo un valor de CBR al 100% del 9%, mostrando un incremento del 125% con respecto a su muestra patrón C-2, mientras que el CBR al 95% es de 8% con un incremento del 167%.

5. La muestra C-3 con 25% de EAF a 2.54 cm (1 in) de penetración, tuvo un valor de CBR al 100% del 6%, mostrando un incremento del 50% con respecto a su muestra patrón C-3, mientras que el CBR al 95% es de 8% con un incremento del 167%.

6. Para el Manual de Ensayos del MTC (2016), los CBR arrojados con la adición máxima del 25%, están entre 6% y 10%, siendo considerados utilizables para subrasantes regulares. Estos resultados, al ser de suelos arcillosos, mejoran sus condiciones de inadecuado e insuficiente a regulares para ser trabajado.

7. Los materiales reutilizables como la escoria EAF pueden llegar a ser empleados en la estabilización de suelos arcillosos, presentando mejoras de acuerdo a un % óptimo de adición de ellos sobre el suelo normal usado en subrasantes.

## **Agradecimiento**

El autor del presente artículo está muy agradecido por el apoyo incondicional del Laboratorio de Ingeniería Civil Ambiental de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Asimismo, dar las gracias a los autores que han sido referenciados en el presente artículo, debido a que sin sus documentos no habría sido posible la revisión de la presente investigación.

## **Referencias**

[1] Aamer N and Al-Rkaby A (2022) Strength, Durability and Microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil. *Case Studies in Construction Materials* 16: e00988.

[2] Abdullah H, Shahin M, Walske M (2019) Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag. *Soils and Foundations* 59: 1906-1920.

[3] Adeyanju E, Austin C, Akinwumi I and Busari A (2020) Subgrade Stabilization using Rice Husk Ash-based Geopolymer (GRHA) and Cement Kiln Dust (CKD). *Case Studies in Construction Materials* 13: e00388.

[4] Aksu G and Eskisar T (2023) The geomechanical properties of soils treated with nanosilica particles. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 15: 954-969.

[5] Amakye S and Abbey S (2021) Understanding the performance of expansive subgrade materials treated with non-traditional stabilisers: A review. *Cleaner Engineering and Technology* 4: 100159.

[6] Attom M, Al-Akhras N and Malkawi A (2009) Effect of fibres on the mechanical properties of clayey soil. *Geotechnical Engineering* 162: 277-282.

[7] Bakhshizadeh A, Khayat N and Horpibulsuk S (2022) Surface stabilization of clay using sodium alginate. *Case Studies in Construction Materials* 16: e01006.

[8] Bernardi C, Yamato M, Silva W, Reinaldo V, Cavali C and Dos Santos L (2023) Mechanical properties of a clay soil reinforced with rice husk under drained and undrained conditions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.

- [9] Cikmit, A. A., Tsuchida, T., Hashimoto, R., Honda, H., Kang, G., & Sogawa, K. (2019). Expansion characteristic of steel slag mixed with soft clay. *Construction and Building Materials*, 227, 116799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116799>.
- [10] Ebailila M, Kinuthia J, Oti J and Al-Qaked Q (2022) Sulfate soil stabilization with binary blends of lime-silica fume and lime-ground granulated blast furnace slag. *Transportation Geotechnics* 37: 100888.
- [11] Islam S, Islam J and Robiul N (2022) Improvement of consolidation properties of clay soil using fine-grained construction and demolition waste. *Helion* 8: e11029.
- [12] Juveria F, Rajeev P, Jegatheesan P and Sanjayan J (2023) Impact of stabilization of mechanical properties of recycled concrete aggregate mixed with waste tyre rubber as a pavement material. *Case Studies in Construction Materials* 18: e02001.
- [13] Khodabandeh M, Nagy G and Torok A (2023) Stabilization of collapsible soils with nanomaterials, fibers, polymers, industrial waste, and microbes: Current trends. *Construction and Building Materials* 368: 130463.
- [14] Lopez A and Korkiala-Tanttu L (2023) Stabilisation of Malmi soft clay with traditional and low-CO2 binders. *Transportation Geotechnics* 38: 100920.
- [15] Ministerio de Transporte y Comunicaciones Perú. (2016). Manual de Ensayo de Materiales. [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf).
- [16] Miraki H, Shariatmadari N, Ghadir P, Jahandari S, Tao Z and Siddique R (2022) Clayey soil stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 14: 576-591.
- [17] Mirzababaei M, Arulrajah A and Ouston M (2017) Polymers for stabilization of soft clay soils. *Procedia Engineering* 189: 25-32.
- [18] Mujtaba, H., Khalid, U., Farooq, K., Elahi, M., Rehman, Z., & Shahzad, H. M. (2020). Sustainable Utilization of Powdered Glass to Improve the Mechanical Behavior of Fat Clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(12), 3628–3639. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0159-2>
- [19] Ojuri O, Ramdas V, Aderibigbe E, Williams C, Ramchuran S and Al-Nageim H (2022). Improving strength and hydraulic characteristics of regional clayey soils using biopolymers. *Case Studies in Construction Materials* 17: e01319.
- [20] Parthiban D, Sivalinga D, Koda E, Daria M, Piechowicz K, Osinski P and Van Duc B (2022) Role of industrial based precursors in the stabilization of weak soils with geopolymer-A review. *Case Studies in Construction Materials* 16: e00886.

[21] Rezaei-Hosseiniabadi M, Bayat M, Nadi B and Rahimi A (2022) Sustainable utilization of steel slag as granular column for ground improvement in geotechnical projects. *Case Studies in Construction Materials* 17: e01333.

[22] Safi W and Singh S (2022) Efficient and effective improvement and stabilization of clay soil with waste materials. *Materials Today: Proceedings* 51: 947-955.

[23] Shalabi F, Asi I and Qasrawi H (2017) Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* 29, 394-399.

[24] Tajaddini A, Saberian M, Kamalzadeh V, Li J and Maqsood T (2023) Improvement of mechanical strength of low-plasticity clay soil using geopolymer-based materials synthesized from glass powder and copper slag. *Case Studies in Construction*

[25] Tholkamudalige S, Perera A, Saberian M, Zhu J, Roychand R and Li J (2022) Effect of crushed glass on the mechanical and microstructural behavior of highly expansive clay subgrade. *Case Studies in Construction Materials* 17: e01244.

[26] Tran T, Behravan A and Brand A (2022) Heat of hydration in clays stabilized by a high-alumina steel furnace slag. *Cleaner Materials* 5: 100105.

[27] Wang S, Xue Q, Ma W, Zhao K and Wu Z (2021) Experimental study on mechanical properties of fiber-reinforced and geopolymer-stabilized clay soil. *Construction and Building Materials* 272: 121914.

[28] Wilkinson A, Haque A and Kodikara J (2010) Stabilisation of clayey soils with industrial by-products: part A. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*: 149-163

[29] World Steel in Figures 2022. (s.f.). worldsteel.org. <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/#world-crude-steel-production-1950-to-2021>

[30] Wu J, Lui Q, Deng Y, Yu X, Feng Q and Yan Q (2019) Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways. *Soils and Foundations* 59: 955-965.

[31] Wu J, Min Y, Li B, Zheng X (2021) Stiffness and strength development of the soft clay stabilized by the one-part geopolymer under one dimensional-compressive loading. *Soils and Foundations* 61: 974-988.

[32] Xu B, Yi Y (2022) Stabilisation/solidification of lead contaminated soil using ladle furnace slag and carbon dioxide. *Soils and Foundations* 62: 101205.

[33] Zornberg J and Roodi G (2021) Use of Clayey Soil Strength Improvement by Using Alkali Activated Slag Reinforcing. *Geosynthetics International* 28 No.3.

[34] Zurinskas D, Vaiciukyniene D, Stelmokaitis G and Dorosevas V (2020) Clayey Soil Strength Improvement by Using Alkali Activated Slag Reinforcing. *Minerals*.