

VERONICA MAMANI PAREDES

Estabilización de suelos cohesivos incorporando escoria de acero con fines de cimentación utilizando

 My Files My Files Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:461373900

Fecha de entrega

22 may 2025, 5:48 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

22 may 2025, 5:51 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

Estabilización de suelos cohesivos incorporando escoria de acero con fines de cimentación utiliza....pdf

Tamaño de archivo

1.3 MB

24 Páginas

7331 Palabras

33.990 Caracteres

10% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text
- Small Matches (less than 8 words)

Top Sources

- 8%  Internet sources
- 3%  Publications
- 7%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 8% Internet sources
- 3% Publications
- 7% Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	hdl.handle.net	2%
2	Internet	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
3	Internet	repository.usta.edu.co	<1%
4	Internet	upc.aws.openrepository.com	<1%
5	Internet	www.coursehero.com	<1%
6	Internet	idbinvest.org	<1%
7	Internet	inyi.journals.yorku.ca	<1%
8	Submitted works	Universidad Pontificia Bolivariana on 2019-02-21	<1%
9	Internet	doku.pub	<1%
10	Submitted works	Universidad Continental on 2025-04-30	<1%
11	Submitted works	Universidad Continental on 2025-05-21	<1%

12	Internet	www.uac.edu.co	<1%
13	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2021-07-06	<1%
14	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2024-07-08	<1%
15	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2024-11-26	<1%
16	Submitted works	Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga on 2022-07-19	<1%
17	Submitted works	Universidad Privada Antenor Orrego on 2024-09-10	<1%
18	Submitted works	Universidad San Ignacio de Loyola on 2018-05-23	<1%
19	Submitted works	BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA on 2019-10-22	<1%
20	Submitted works	unasam on 2024-12-18	<1%
21	Internet	www.greenworldjournal.com	<1%
22	Internet	www.scribd.com	<1%
23	Submitted works	Universidad Privada Antenor Orrego on 2019-10-07	<1%
24	Internet	www.hormigonyacero.com	<1%
25	Submitted works	Escuela Politecnica Nacional on 2015-04-27	<1%

26	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2023-09-11	<1%
27	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2024-06-13	<1%
28	Submitted works	Universidad San Francisco de Quito on 2021-03-02	<1%
29	Internet	tesis.ucsm.edu.pe	<1%
30	Publication	Emerson Cordeiro Lopes, Taciano Oliveira da Silva, Heraldo Nunes Pitanga, Leona...	<1%
31	Submitted works	Johannes Kepler Universität Linz on 2022-01-11	<1%
32	Publication	Omar Farid Ojeda Farías, Miguel Ángel Baltazar Zamora, José Manuel Mendoza R...	<1%
33	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2023-11-29	<1%
34	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-04-22	<1%
35	Submitted works	Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga on 2024-11-20	<1%
36	Internet	conavi.go.cr	<1%
37	Internet	cybertesis.uni.edu.pe	<1%
38	Internet	link.springer.com	<1%
39	Internet	myslide.es	<1%

40

Internet

repositorioacademico.upc.edu.pe

<1%

41

Submitted works

upeu on 2024-10-24

<1%

Stabilization of Cohesive Soils Incorporating Steel Slag for Foundation Purposes Using Numerical Software

Estabilización de suelos cohesivos incorporando escoria de acero con fines de cimentación utilizando un software

Autores / Authors:

Brayan Cusi Tutacano

Universidad Peruana Union, Puno, Perú

Peruvian Union University, Puno, Peru

Email: brayan.cusi@upeu.edu.pe

Teléfono: +51 986155045

Autor de correspondencia / Corresponding author

Verónica Mamani Paredes

Universidad Peruana Union, Puno, Perú

Peruvian Union University, Puno, Peru

Email: veronica.mamani@upeu.edu.pe

Teléfono: +51 900 967 316

Gerardo William Pari Quispe

Universidad Nestor Caceres Velasquez, Puno, Perú

Nestor Caceres Velasquez University, Puno, Peru

Email: gerardo.pari@upeu.edu.pe

Teléfono: +51 999 999 997

Este artículo se publica bajo la licencia Creative Commons Atribución CC-BY 4.0

This article is published under the Creative Commons Attribution License CC-BY 4.0

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Resumen:

La estabilización de suelos cohesivos es crucial para evitar asentamientos y fallas estructurales. En este estudio se evaluó el uso de escoria de acero como estabilizante en proporciones de 0%, 20%, 40% y 50%. Se realizaron ensayos de laboratorio y modelación numérica con Plaxis 2D. Los resultados mostraron mejoras significativas en cohesión, densidad y capacidad de carga del suelo. La adición de escoria redujo la plasticidad y mejoró el comportamiento mecánico, siendo una alternativa sostenible para cimentaciones.

Abstract:

The stabilization of cohesive soils is essential to prevent settlements and structural failures. This study evaluated the use of steel slag as a stabilizing agent in proportions of 0%, 20%, 40%, and 50%. Laboratory tests and numerical modeling with Plaxis 2D were conducted. The results showed significant improvements in soil cohesion, density, and bearing capacity. The addition of slag reduced plasticity and enhanced mechanical behavior, positioning it as a sustainable

alternative for foundation applications.

Palabras clave:

Capacidad portante, cimentaciones, estabilización, scoria de acero, suelo cohesivo.

Keywords:

Bearing capacity, foundations, stabilization, steel slag, cohesive soil.

21 Declaración de interés:

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses financieros o personales que haya influido en el trabajo presentado.

Contribución de los autores (CRediT):

Brayan Cusi Tutacano: Metodología, Investigación, Redacción del borrador original, Visualización.

Verónica Mamani Paredes: Investigación, Redacción, Validación de resultados.

Gerardo William Pari Quispe: Supervisión, Revisión y Edición, Conceptualización.

12 Declaración de originalidad: El presente manuscrito es original, no ha sido publicado anteriormente, ni se encuentra en proceso de evaluación en otra revista. Los autores se comprometen a no enviarlo a otra publicación mientras se encuentre en evaluación en la Revista Ingeniería de Construcción.

Stabilization of Cohesive Soils Incorporating Steel Slag for Foundation Purposes Using Numerical Software

Estabilización de suelos cohesivos incorporando escoria de acero con fines de cimentación utilizando un software

Verónica Mamani Paredes¹ y Brayan Cusi Tutacano² y Gerardo William Pari Quispe³

ABSTRACT

The stabilization of cohesive soils is crucial to prevent settlements. However, traditional methods, such as the use of cement, generate greenhouse gases, exacerbating climate change. In this context, this research proposes steel slag, an industrial by-product with high environmental impact, as an alternative stabilizing agent. Steel slag was incorporated into cohesive soils in proportions of 0%, 20%, 40%, and 50%, and its effects were evaluated through unconfined compression tests for foundation purposes. Additionally, Plaxis 2D software was used to model the soil behavior under structural loading, aiming to reduce geotechnical risks. In conclusion, increasing the slag content reduces soil plasticity, making it less cohesive and more granular, which improves its SUCS classification. Density and cohesion are also enhanced, increasing the bearing capacity up to 868.81 kPa. This allows for foundation optimization and cost reduction. The deformation analysis indicates that the improved soil is more stable and distributes stresses more efficiently, reducing the risk of structural failure. Thus, steel slag represents a technically and environmentally viable solution for improving low-quality soils.

Keywords: Bearing capacity, foundations, stabilization, steel slag, cohesive soil.

RESUMEN

La estabilización de suelos cohesivos es crucial para evitar asentamientos. Sin embargo, los métodos tradicionales, como el uso de cemento, generan gases de efecto invernadero, lo que agrava el cambio climático. En este contexto, esta investigación propone la escoria de acero, un residuo industrial con alto impacto ambiental, como estabilizante alternativo.

Se incorporaron porcentajes de escoria de 0%, 20%, 40% y 50% en suelos cohesivos, evaluando su efecto mediante ensayos de compresión no confinada, con fines de cimentación. Además, se utilizó el software Plaxis 2D para modelar el comportamiento del suelo bajo carga estructural, con el fin de reducir riesgos geotécnicos.

En conclusión, al aumentar el contenido de escoria, se reduce la plasticidad del suelo, haciéndolo menos cohesivo y más granular, lo que mejora su clasificación SUCS. También se incrementa la densidad y la cohesión, elevando la capacidad de carga hasta 868.81 kPa. Esto permite optimizar cimentaciones y reducir costos. El análisis de deformaciones indica que el suelo mejorado es más estable y distribuye mejor los esfuerzos, disminuyendo el riesgo de falla estructural. Así, la escoria de acero representa una solución técnica y ambientalmente viable para mejorar suelos de baja calidad.

Palabras clave: Capacidad portante, cimentaciones, estabilización, escoria de acero, suelo cohesivo.

1. INTRODUCCION

La industria siderúrgica mundial produjo 1,905.5 millones de toneladas de acero bruto en 2021, generando como subproducto entre el 10% y 15% de escorias, compuestas por óxidos metálicos cuya composición varía según el proceso siderúrgico (Espinosa et al., 2023). La escoria de horno cuchara (LFS), derivada de la refinación secundaria, representa cerca de 30 millones de toneladas al año. A nivel global, se producen más de 200 millones de toneladas de escoria, de las cuales más de 100 millones provienen de China, aunque solo el 29% se reutiliza (Zhang et al., 2024), lo que ocasiona acumulación en vertederos y problemas ambientales.

El manejo inadecuado de residuos industriales, junto con la incineración, genera cenizas contaminantes que contienen metales pesados, complicando su disposición. Además, métodos como el tratamiento térmico son costosos, y el uso de cemento como estabilizante, aunque eficaz, contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero (Varaprasad et al., 2020).

En países en desarrollo, los suelos arcillosos blandos representan un desafío para la construcción, debido a su alta plasticidad, baja resistencia al corte y elevada compresibilidad (Preetham et al., 2019). Estos suelos requieren estabilización para garantizar cimentaciones seguras. Uno de los problemas críticos es su comportamiento expansivo con presencia de agua, que compromete la estabilidad estructural (Manso et al., 2013).

En el departamento de Puno, Perú, con una población proyectada de 1,199,636 habitantes para 2025 (INEI, 2017), la demanda habitacional se relaciona con la necesidad de edificar en suelos de baja capacidad portante.

Por ello, el presente estudio evalúa la sustitución parcial del suelo cohesivo con escoria de acero en proporciones de 0%, 20%, 40% y 50%, para mejorar sus propiedades físico-mecánicas con fines de cimentación. Se utilizará el software Plaxis 2D para simular el comportamiento del suelo ante cargas estructurales. Esta propuesta beneficia a la comunidad, a la industria siderúrgica y a la construcción, al ofrecer una solución técnica, ambiental y económicamente viable para la estabilización de suelos problemáticos.

2. METODOLOGIA Y MATERIALES

2.1. Materiales y lugar de muestreo

La arcilla utilizada en esta investigación fue recolectada en dos localidades del departamento de Puno, Perú: los distritos de Juliaca y Pucará. Para obtener un material representativo, se retiró la capa superficial del terreno y se extrajo el suelo cohesivo a una profundidad aproximada de 2 metros desde el nivel del terreno natural. Las coordenadas exactas de los puntos de muestreo, correspondientes a cuatro calicatas, se presentan en la Tabla 1.

Las muestras obtenidas fueron sometidas a ensayos de laboratorio con el objetivo de determinar sus propiedades físicas en estado natural, tales como el contenido de humedad, la densidad, y los límites de Atterberg. Estos resultados se detallan en la Tabla 2.

Asimismo, se llevó a cabo un análisis granulométrico mediante métodos de tamizado y sedimentación, con el fin de evaluar la distribución del tamaño de partículas y clasificar texturalmente el suelo. La curva obtenida se muestra en la Figura 1, permitiendo caracterizar el comportamiento del suelo según su composición granulométrica.

Tabla 1: Punto de Muestreo

Calicata	Norte (m)	Este (m)	Cota (msnm)
C-1	8287860,00	376714,00	3824.32
C-2	8336496.62	354225.40	3924.97
C-3	8336542.2	354054.26	3924.52
C-4	8288244,00	377159,00	3827.45

Nota: Fuente propia

Tabla 2. Propiedades físicas de los suelos en estado natural

N.º Calicata	Contenido de humedad óptimo (%)	Densidad Natural (gr/cm3)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS	AASHTO
C1	17.75%	2.057	53.21	27.72	25.49	CH	A-7-6 (17)
C2	24.10%	2.021	68.93	26.81	42.12	CH	A-7-6 (20)
C3	21.80%	2.05	69.36	27.04	42.32	CH	A-7-6 (20)
C4	16.10%	2.029	40.2	33.27	7.93	ML	A-4 (8)

Nota: Fuente propia

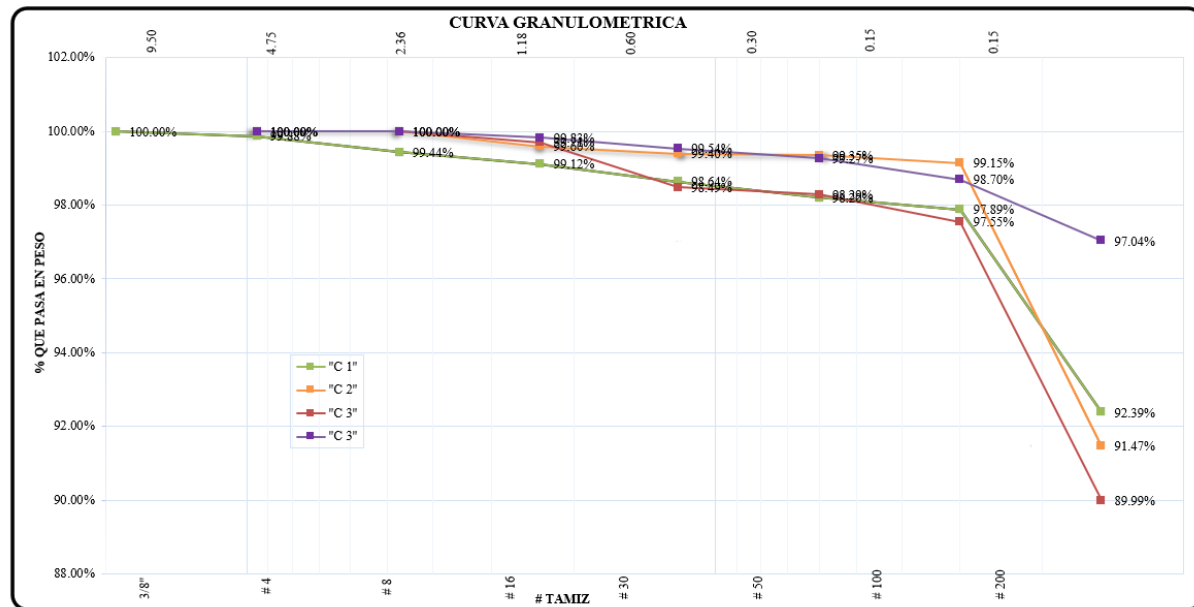


Figura 1. Curva granulométrica de calicatas en su estado natural.

2.2.Descripción de la edificación

Figura 3. Plano de cimentaciones y modelo 3D de la edificación Revit. (a) Plano de cimentaciones de la edificación propuesta, (b) Modelo 3D de la edificación propuesta.

Consideraciones para el análisis sísmico estático, Dx y Dy

Tabla 4: Parámetros sísmicos

Parámetros Sísmicos	
Zona sísmica (Z)	0.35
Período Predominante (Tp)	0.6
Periodo de Control (TL)	2
Coefficiente Sísmico (C)	2.5
Coefficiente de Uso (U)	1
Reducción de Fuerzas Sísmicas (R0)	8
Ia	1
Ip	1
R	8

Nota: Elaboración Propia

Tabla 5: Peso de la edificación

Nivel	Combinación	Peso (kg)	Peso (tn)
Piso 01	P:100%CM+25%CV	112705.14	112.71
Piso 02	P:100%CM+25%CV	105782.85	105.78
Piso 03	P:100%CM+25%CV	107789.35	107.79

Nota: Elaboración Propia

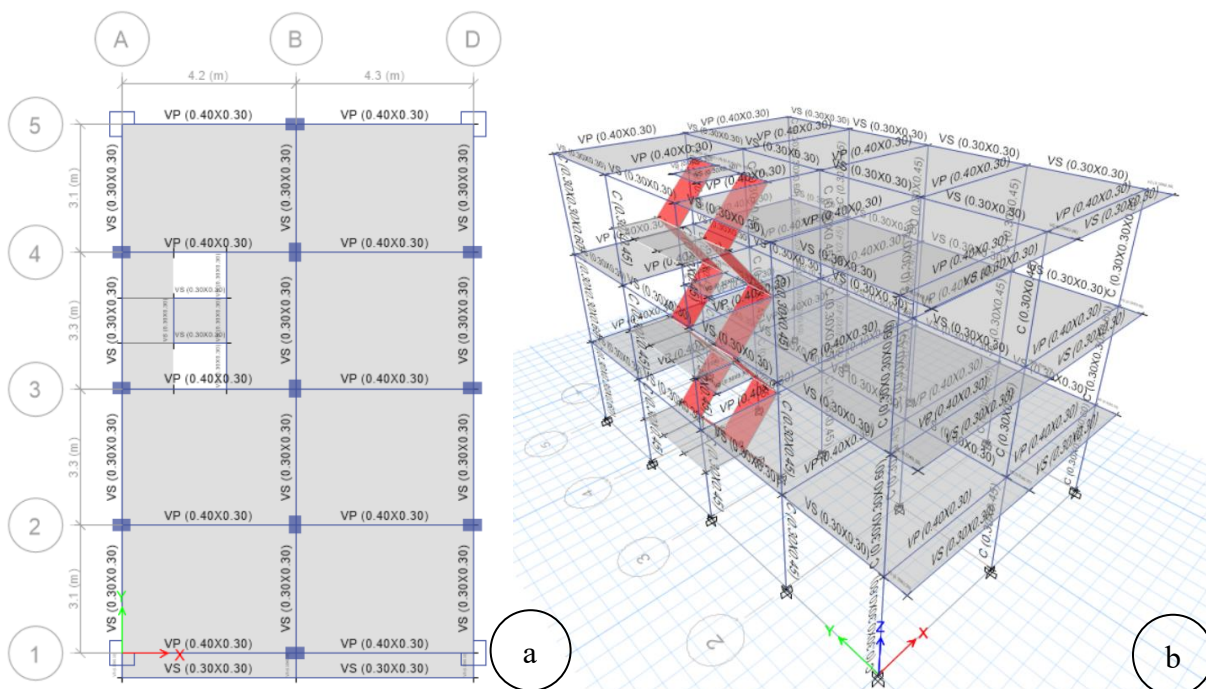


Figura 3. Plano del primer nivel y modelo 3D de la edificación Etabs. (a) Configuración estructural de la edificación propuesta, (b) Vista 3D de la configuración estructural.

2.3. Metodología

2.3.1. Escoria de acero

La escoria de acero utilizada en este estudio fue recolectada en el distrito de Juliaca, en el departamento de Puno, principalmente en la empresa RECTISUR, ubicada en la Av. Circunvalación Este. Este material, considerado un residuo sin valor comercial, fue seleccionado para su posterior procesamiento y análisis. La Figura 2 muestra la escoria en su estado original al momento de la recolección.



Figura 4. Escoria de acero recolectado. (a) Establecimiento donde se extrajo la escoria de acero, (b) Escoria de Acero, (c) Maquina que desecha la escoria de acero.

Tabla 6: Análisis químico por fluorescencia de rayos x

Z	Formula	Concentración
20	Ca	2972 PPM
21	Sc	0 PPM
22	Ti	81 PPM
23	V	0 PPM
24	Cr	1240 PPM
25	Mn	5989 PPM
26	Fe	98.469%
29	Cu	2057 PPM

Nota: Elaboración Propia

El análisis químico por fluorescencia de rayos X, muestra que el material analizado está compuesto principalmente por Fe (Hierro) con una concentración del 98.469%, seguido de manganeso (Mn)

con 5989 PPM, cobre (Cu) con 2057 PPM, calcio (Ca) con 2972 PPM, y cromo (Cr) con 1240 PPM. Además, se detectó trazas de titanio (Ti) con 81 PPM, mientras que el escandio (Sc) y vanadio (V) están ausentes. Este análisis sugiere que el material es predominante hierro (Fe), con pequeñas cantidades de otros elementos.

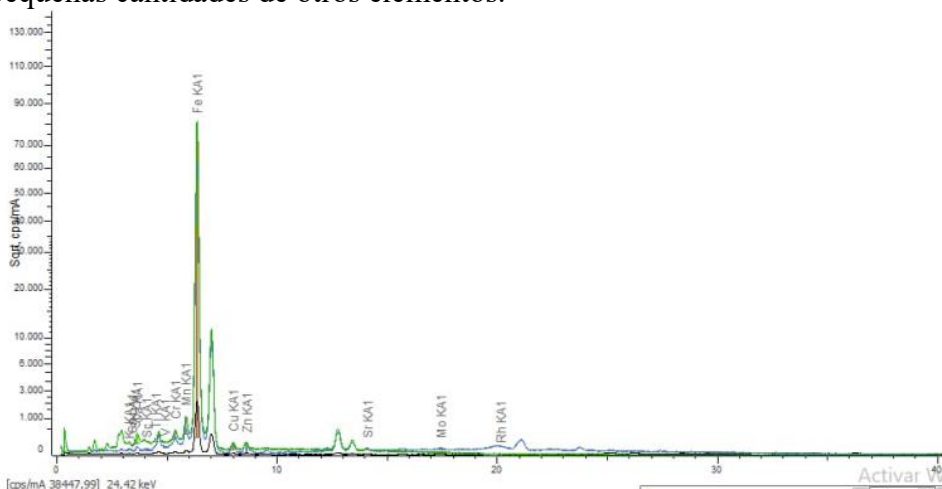


Figura 6. Análisis químico de fluorescencia de rayos X.

2.3.2. Ensayos realizados

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del suelo cohesivo tratado con escoria de acero, se llevaron a cabo diversos ensayos de laboratorio conforme a normas ASTM, orientados a caracterizar sus propiedades físicas y mecánicas, tanto en estado natural como estabilizado. Este material se incorporó al suelo en proporciones de 0%, 20%, 40% y 50%, con el objetivo de evaluar su efecto como estabilizante.

Tabla 7: Normativa de ensayos realizados

Ensayos	Normativa
Exploración y muestreo de suelos	ASTM D 420
Método estándar para determinar el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos	ASTM D 4318
Determinación del contenido de humedad de un suelo	ASTM D 2216
Análisis granulométrico de suelos por tamizado	ASTM D 422
Clasificación de suelos método SUCS	ASTM G 2487
Clasificación de suelos AASHTO	ASTM M - 145
Resistencia a la compresión no confinada	ASTM D 2166
Proctor modificado	ASTM D 698
Consolidación unidimensional	ASTM D 2435

Nota: Elaboración Propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El espectro de la figura 6, confirma la predominancia del hierro en la composición de la muestra, con la presencia de otros elementos en concentraciones menores, lo cual es consistente con el análisis químico de la tabla 6.



Figura 6. Escoria de acero analizado.

Tabla 8: Resultados obtenidos de los ensayos de Limites de Atterbeng

N.º Calicata	Contenido de humedad optimo (%)	Densidad Natural (gr/cm3)	Escoria de Acero (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS	AASHTO
C1	17.75 %	2.057	0%	53.21	27.72	25.49	CH	A-7-6 (17)
	18.20 %	1.982	5%	47.13	21.03	26.10	CL	A-7-6 (16)
	16.00 %	2.142	20%	40.23	17.07	23.17	CL	A-6 (13)
	14.10 %	2.468	40%	29.90	14.94	14.96	SC	A-6 (3)
	13.80 %	2.619	50%	25.09	10.69	14.40	SC	A-6 (2)
C2	24.10 %	2.021	0%	68.93	26.81	42.12	CH	A-7-6 (20)
	23.90%	2.023	5%	61.58	24.75	36.83	CH	A-7-6 (20)
	21.70 %	2.184	20%	50.67	23.14	27.52	CH	A-7-6 (17)
	16.30 %	2.357	40%	40.31	17.14	23.17	CL	A-6 (8)
	14.20 %	2.599	50%	32.25	10.97	21.27	SC	A-2-6 (2)
C3	21.80 %	2.050	0%	69.36	27.04	42.32	CH	A-7-6 (20)
	22.00 %	2.113	5%	66.89	26.09	40.80	CH	A-7-6 (20)
	17.70 %	2.207	20%	59.08	21.46	37.62	CH	A-7-6 (20)
	15.80 %	2.648	40%	46.45	18.66	27.79	CL	A-7-6 (14)
	14.20 %	2.629	50%	36.04	14.81	21.23	SC	A-6 (4)
C4	16.10 %	2.029	0%	40.20	33.27	7.93	ML	A-4 (8)
	14.00 %	2.045	5%	34.11	28.86	5.25	ML	A-4 (8)
	12.20 %	2.254	20%	28.82	26.33	2.49	ML	A-4 (8)

10.20 %	2.530	40%	20.46	17.50	2.96	CL	A-4 (4)
9.80 %	2.764	50%	16.90	15.93	0.97	SC	A-4 (0)

Fuente: Elaboración Propia

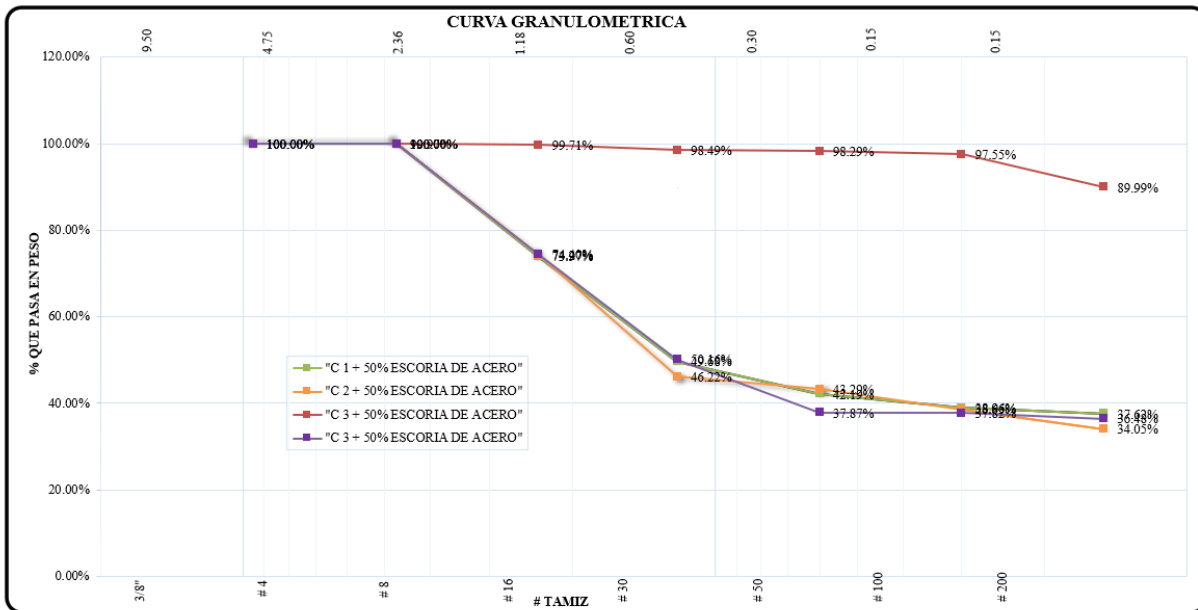


Figura 7. Curva granulométrica de calicatas con sustitución de 50% de escoria de acero.

La incorporación de escoria de acero provocó una notable reducción del índice de plasticidad en todas las muestras analizadas. En la calicata C1, este índice pasó de 25.49% a 14.40%; en C2, de 42.12% a 21.27%; en C3, de 42.32% a 21.23%; y en C4, de 7.93% a 0.97%, alcanzando en este último caso una disminución del 87.76%, lo que prácticamente elimina la plasticidad del suelo. Estos resultados demuestran la eficacia de la escoria en la mejora geotécnica del suelo. (Manso et al., 2013) observaron efectos similares al mezclar suelo con escoria y cal, reduciendo plasticidad e hinchamiento. Vidal y Montenegro (2017) señalan que la escoria, al tener un alto contenido de arena, mejora la graduación del suelo arcilloso y disminuye su plasticidad. Por su parte, (Kabeta & Lemma, 2023) reportaron reducciones en los límites de Atterberg al adicionar 25% de escoria: el límite líquido bajó de 90.8% a 65.2% y el índice de plasticidad de 30.5% a 22.7%. Finalmente, (Preetham et al., 2019) encontraron una disminución del índice de plasticidad de 58% a 20% al emplear 50% de escoria.

Formula 1.

$$E = \frac{(25 \frac{\text{golpes}}{\text{capa}})(5 \text{ capas})(44.5 \times 10^{-3} \text{ KN})(0.4572 \text{ m})}{943.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 2696 \text{ KN} - \text{m/m}^3$$

Para la prueba Proctor modificada se utilizó un molde de 943.3 cm³, como del caso de la prueba de Proctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en 5 capas por un martillo que pesa 4.536 kg y tiene una caída de 457.2 mm. El número de golpes de martillo es de 25, como es del caso de la prueba de Proctor Estándar.

- ✓ Para el ensayo se realizó la preparación del material seco y se mezcló con agua hasta alcanzar diferentes niveles de humedad.
- ✓ Para la compactación del suelo se realizó en 5 capas dentro del molde de 943.3 cm³.
- ✓ La aplicación de golpes se dan 25 golpes por capa con un martillo de 44.5 N (4.536kg) que cae desde 457.2 mm.
- ✓ Se determina la densidad seca, se pesa la muestra compactada y se calcula la densidad seca para cada contenido de humedad.

Tabla 9: Resultados de contenido de humedad óptimo y máxima densidad seca.

Nº Calicatas	Escoria de Acero (%)	MDD (mg/cm ³)	OMC (%)
C-1	0	1.779	17.75
	5	1.710	18.20
	20	1.870	16.00
	40	2.205	13.80
	50	2.384	14.30
C-2	0	1.653	24.10
	5	1.648	23.90
	20	1.815	21.70
	40	2.146	16.30
	50	2.359	14.20
C-3	0	1.713	21.80
	5	1.767	22.00
	20	1.934	17.70
	40	2.381	15.80
	50	2.422	14.20
C-4	0	1.773	16.10
	5	1.815	14.00
	20	2.068	12.20
	40	2.337	10.20
	50	2.562	9.80

Fuente: Elaboración Propia

El contenido de humedad óptimo (OMC) y la densidad seca máxima (MDD) se evaluaron para suelos con sustituciones de escoria del 0% al 50%. Se observó una ligera disminución del OMC, ya que la escoria no absorbe agua como la arcilla. En C1, con 5% de escoria, el OMC aumentó a 17.75% y la MDD fue de 1.71 mg/cm³. Según Espinosa et al. (2023), con 5% de escoria LFS, el OMC pasó de 13.50% a 14.50%, y la MDD bajó de 1.75 a 1.73 mg/cm³. En cambio (Kabeta & Lemma, 2023) reportaron un aumento de MDD de 1.504 a 1.69 g/cm³ y una reducción del OMC de 19.77% a 12.01%. En los ensayos propios, el OMC y MDD variaron según cada calicata: C1 alcanzó 2.384 mg/cm³ con 14.30% de OMC; C2, 2.359 mg/cm³ y 14.20%; C3, 2.422 mg/cm³ y 14.20%; y C4, 2.562 mg/cm³ con 9.80%. Esto demuestra que el OMC depende de las características del suelo, siendo menor donde hay mayor densidad, como en C4.

Tabla 10: Resultados del ensayo de Resistencia a la compresión no confinada

Nº Calicata	Escoria de acero (%)	Carga Aplicada (Kg)	Cohesión (Kg/cm2)
C-1	0	11.97	0.172
	5	226.23	3.687
	20	240.30	4.054
	40	277.54	4.467
	50	282.70	4.702
C-2	0	37.10	0.502
	5	152.87	2.312
	20	190.75	2.723
	40	237.27	3.280
	50	257.83	3.582
C-3	0	37.57	0.529
	5	182.57	2.576
	20	219.47	3.101
	40	230.40	3.255
	50	233.47	3.296
C-4	0	28.90	0.439
	5	192.22	2.531
	20	233.10	3.278
	40	241.10	3.187
	50	205.70	3.058

Fuente: Elaboración Propia

La capacidad portante del suelo mejora con la adición de escoria de acero, al igual que la cohesión, lo que indica una mayor resistencia para soportar cargas estructurales. (Espinosa et al., 2023) señalan que con la sustitución de LFS, la cohesión aumentó de 45 kPa (suelo natural) a 76 kPa. (Varaprasad et al., 2020) observaron que el uso de residuos sólidos municipales como estabilizante incrementó la capacidad portante hasta en un 25%, antes de disminuir con mayores contenidos. El ensayo de consolidación unidimensional, realizado según ASTM D2435/D2435M-11, evaluó el comportamiento del suelo natural y del suelo con 50% de escoria bajo carga incremental. Este ensayo permite obtener la curva de compresibilidad, útil para estimar asentamientos a largo plazo. La muestra fue tallada, saturada y colocada en un anillo metálico, evitando la expansión lateral. Las cargas se aplicaron siguiendo tiempos establecidos (desde 6 segundos hasta 24 horas), y luego se redujeron de forma secuencial al alcanzar el máximo. Estos resultados permiten evaluar la mejora del suelo en cuanto a consolidación y soporte estructural.

Tabla 11: Ensayo de consolidación unidimensional del suelo con 0% de escoria de acero

Ensayo de consolidación - 0% Escoria de acero				
Carga aplicada (kg/cm ²)	Lectura Final (pulg)	2H (pulg)	Altura vacíos (pulg) 2H-2H ₀	Relación de Vacíos (e)
0	0	0,7909	0,4114	1,0838
0,43	0,0050	0,7859	0,4064	1,0707
0,85	0,0250	0,7659	0,3864	1,0180
1,70	0,0615	0,7294	0,3499	0,9218
3,40	0,1180	0,6729	0,2934	0,7730
6,80	0,2040	0,5869	0,2074	0,5464
6,80	0,2040	0,8569	0,2074	0,5464
3,40	0,1938	0,5971	0,2176	0,5733
1,70	0,1750	0,6159	0,2364	0,6228

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 12: Resultados del ensayo de consolidación unidimensional del suelo con 0% de escoria de acero

Variación de la relación de vacíos y parámetros de consolidación	
Relación de vacíos inicial	1,0838
Relación de vacíos final	0,5464
Presión de consolidación	1,96 kg/cm ²
Índice de recompresión	0,127 cm ³ /kg
Índice de compresión	0,753 cm ³ /kg

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 13: Ensayo de consolidación unidimensional del suelo con 50% de escoria

Ensayo de consolidación - 50% Escoria de acero				
Carga aplicada (kg/cm ²)	Carga aplicada (kg/cm ²)	2H (pulg)	Altura vacíos (pulg) 2H-2H ₀	Relación de Vacíos (e)
0	0	0,7909	0,3912	0,9766
0,43	0,0092	0,7817	0,3819	0,9555
0,85	0,0535	0,7374	0,3377	0,8448

1,71	0,1183	0,6727	0,2729	0,6828
3,41	0,2300	0,5609	0,1612	0,4032
6,82	0,3743	0,4167	0,0169	0,0424
6,82	0,3743	0,4167	0,0169	0,0424
3,41	0,3675	0,4234	0,0237	0,0593
1,71	0,3568	0,4342	0,0344	0,0862

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 14: Resultados del ensayo de consolidación unidimensional del suelo con 50% de escoria

Variación de la relación de vacíos y parámetros de consolidación	
Relación de vacíos inicial	0,9786
Relación de vacíos final	0,0424
Presión de consolidación	2,02 kg/cm2
Índice de recompresión	0,073 cm3/kg
Índice de compresión	0,888 cm3/kg

Fuente: Elaboración Propia

Para determinar la presión máxima que puede soportar el suelo se determinó con la siguiente:

formula 2.

$$q_u = C_u N_c S_c + q' N_q S_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma$$

Donde:

q_u = Capacidad portante última del suelo.

C_u = Cohesión no drenada del suelo.

N_c, N_q, N_γ = Factores de capacidad de carga de Terzaghi.

S_c, S_q, S_γ = Factores de forma que corrigen la capacidad portante según la geometría de la cimentación.

q' = Sobrecarga efectiva en la base de la base de la cimentación.

γ = Peso unitario del suelo.

B = Ancho de la cimentación.

Tabla 15: Resultados de capacidad de carga del suelo por Terzaghi Suelo Insitu

Parámetros	Valor	Unidades
C_u	52,14	kPa
γ_{s1}	16	kN/m3
γ_{s2}	16,78	kN/m3
γ_{s2_sat}	20,47	kN/m3
γ_w	9,81	kN/m3
N_c	6,14	(-)

Nq	1,41	(-)
Ny	0,04	(-)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 16: Resultados de capacidad de carga del suelo por Terzaghi Suelo Insitu

Df (m)	L ≥ B				Cuadrada			Rectangular			Capacidad de carga			
	B	L	B/L	q*	Sc	Sq	Sy	Sc	Sq	Sy	qu (kPa)	qu (kg/cm2)	qadm (kPa)	qadm (kg/cm2)
1	1	1	1,00	16,00	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	443,43	4,52	147,81	1,51
1,1	1	1	1,00	17,68	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	446,27	4,55	148,76	1,52
1,2	1	1	1,00	19,36	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	449,12	4,58	149,71	1,53
1,3	1	1	1,00	21,03	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	451,96	4,61	150,65	1,54
1,4	1	1	1,00	22,71	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	454,80	4,64	151,60	1,55
1,5	1	1	1,00	24,39	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	457,65	4,67	152,55	1,56
1,6	1	1	1,00	26,07	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	460,49	4,70	153,50	1,57
1,7	1	1	1,00	27,75	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	463,33	4,73	154,44	1,58
1,8	1	1	1,00	29,42	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	466,18	4,75	155,39	1,58
1,9	1	1	1,00	31,10	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	469,02	4,78	156,34	1,59
2,0	1	1	1,00	32,78	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	471,77	4,81	157,26	1,60
2,1	1	1	1,00	33,85	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	473,57	4,83	157,86	1,61
2,2	1	1	1,00	34,91	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	475,38	4,85	158,46	1,62
2,3	1	1	1,00	35,98	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	477,19	4,87	159,06	1,62
2,4	1	1	1,00	37,04	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	478,99	4,89	159,66	1,63
2,5	1	1	1,00	38,11	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	480,80	4,90	160,27	1,63

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 17: Resultados de capacidad de carga del suelo por Terzaghi Suelo Mejorado

Df (m)	L ≥ B				Cuadrada			Rectangular			Capacidad de carga			
	B	L	B/L	q*	Sc	Sq	Sy	Sc	Sq	Sy	qu (kPa)	qu (kg/cm2)	qadm (kPa)	qadm (kg/cm2)
1	1	1	1,00	16,00	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2606,42	26,59	868,81	8,86
1,1	1	1	1,00	18,37	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2610,44	26,63	870,15	8,88
1,2	1	1	1,00	20,75	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2614,46	26,67	871,49	8,89
1,3	1	1	1,00	23,12	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2618,48	26,71	872,83	8,90
1,4	1	1	1,00	25,49	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2622,51	26,75	874,17	8,92
1,5	1	1	1,00	27,87	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2626,53	26,79	875,51	8,93
1,6	1	1	1,00	30,24	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2630,55	26,83	876,85	8,94
1,7	1	1	1,00	32,61	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2634,57	26,87	878,19	8,96
1,8	1	1	1,00	34,98	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2638,59	26,91	879,53	8,97
1,9	1	1	1,00	37,36	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2642,61	26,95	880,87	8,98
2,0	1	1	1,00	39,73	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2646,53	26,99	882,18	9,00
2,1	1	1	1,00	41,46	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2649,45	27,02	883,15	9,01

2,2	1	1	1,00	43,18	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2652,38	27,05	884,13	9,02
2,3	1	1	1,00	44,91	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2655,30	27,08	885,10	9,03
2,4	1	1	1,00	46,63	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2658,22	27,11	886,07	9,04
2,5	1	1	1,00	48,36	1,30	1,20	0,80	1,20	1,20	0,60	2661,14	27,14	887,05	9,05

Fuente: Elaboración Propia

Según Sulca (2023), la capacidad de carga admisible mejora con la incorporación de residuos de concreto demolido, triturado y pulverizado (RCDTP), alcanzando hasta 3.033 kg/cm² con 60% de RCDTP a 1.00 m de profundidad y 4.131 kg/cm² a 1.50 m. (Mahedi et al., 2019) también reportaron un incremento en la resistencia a la compresión del suelo arcilloso al sustituirlo con cenizas volantes. (Kabeta & Lemma, 2023) observaron que agregar 25% de escoria de acero eleva la resistencia a la compresión simple de 94.3 kPa a 170.6 kPa. (Brand et al., 2020) encontraron que con 10% y 15% de escoria, la UCS aumentó de 707.04 kPa (suelo natural) a 2140.83 kPa y 2093.70 kPa, respectivamente, lo que representa incrementos del 67% y 75%. (Preetham et al., 2019) determinaron que el reemplazo del 40% de escoria proporcionó la mayor resistencia, debido a la reducción de partículas finas. Para el análisis numérico, diversos estudios usaron el modelo Mohr-Coulomb, que incluye cinco parámetros: módulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson (ν), ángulo de fricción interna (φ), cohesión (c) y ángulo de dilatación (ψ). En este estudio, se utilizó el software Plaxis 2D con parámetros geotécnicos específicos para la arcilla in situ, lo que permitió evaluar con precisión el comportamiento del suelo estabilizado.

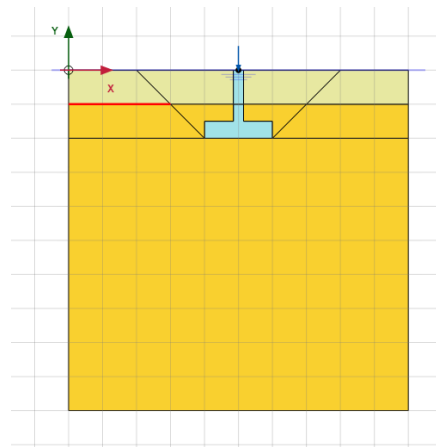


Figura 8. Modelo 2D Suelo Insitu y Mejorado, Plaxis V.24 B=2m Df=2m

Tabla 18: Parámetros geotécnicos arcilla insitu

Propiedades	Valor
Identificación	Arcilla inorgánica
Modelo constitutivo	Mohr - Coulomb
Comportamiento material	No drenado
Peso unitario no saturado	16.78 kN/m ³
Peso unitario saturado	20.47 kN/m ³
Relación de vacíos inicial	0.5000
Porosidad inicial	0.3333

Módulo de Young	450.0 kN/m ²
Coeficiente de Poisson	0.2500
Módulo de corte de referencia	180.0 kN/m ²
Módulo edométrico	540.0 kN/m ²
Velocidad de onda cortante	10.26 m/s
Velocidad de onda primaria o compresional	17.77 m/s
Resistencia al corte no drenado de referencia	52.10 kN/m ²
Ángulo de fricción no drenado	0.000°
Ángulo de dilatación	0.000°

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19: Parámetros geotécnicos arcilla + 50% escoria de acero

Propiedades	Valor
Identificación	Arcilla inorgánica
Modelo constitutivo	Mohr - Coulomb
Comportamiento material	No drenado
Peso unitario no saturado	23.73 kN/m ³
Peso unitario saturado	27.06 kN/m ³
Relación de vacíos inicial	0.5000
Porosidad inicial	0.3333
Módulo de Young	2160 kN/m ²
Coeficiente de Poisson	0.2500
Módulo de corte de referencia	864.0 kN/m ²
Módulo edométrico	2592 kN/m ²
Velocidad de onda cortante	18.90 m/s
Velocidad de onda primaria o compresional	32.73 m/s
Resistencia al corte no drenado de referencia	323.2 kN/m ²
Ángulo de fricción no drenado	0.000°
Ángulo de dilatación	0.000°

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 20: Parámetros del hormigón para zapatas

Propiedades	Valor
Identificación	Hormigón
Modelo constitutivo	Elástico lineal
Comportamiento material	No poroso
Peso unitario no saturado	24.00 kN/m ³
Peso unitario saturado	24.00 kN/m ³
Módulo de Young (E')	200x10 ⁶ kPa
Coeficiente de Poisson (v')	0.25

Fuente: Elaboración Propia

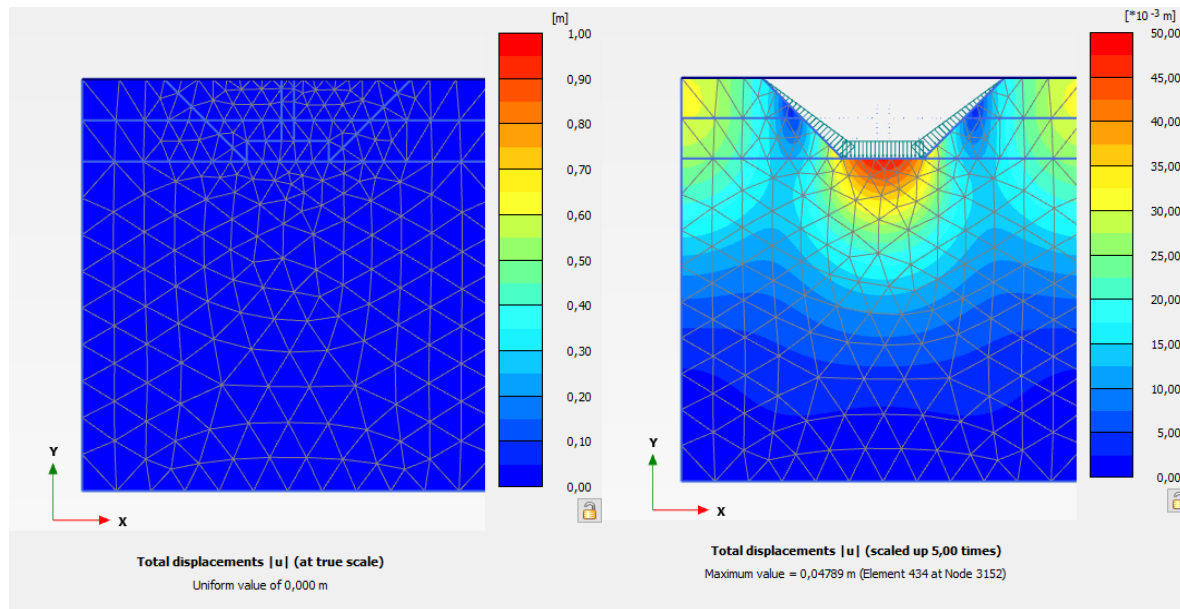


Figura 9. Modelo 2D Fase inicial y etapa de excavación.

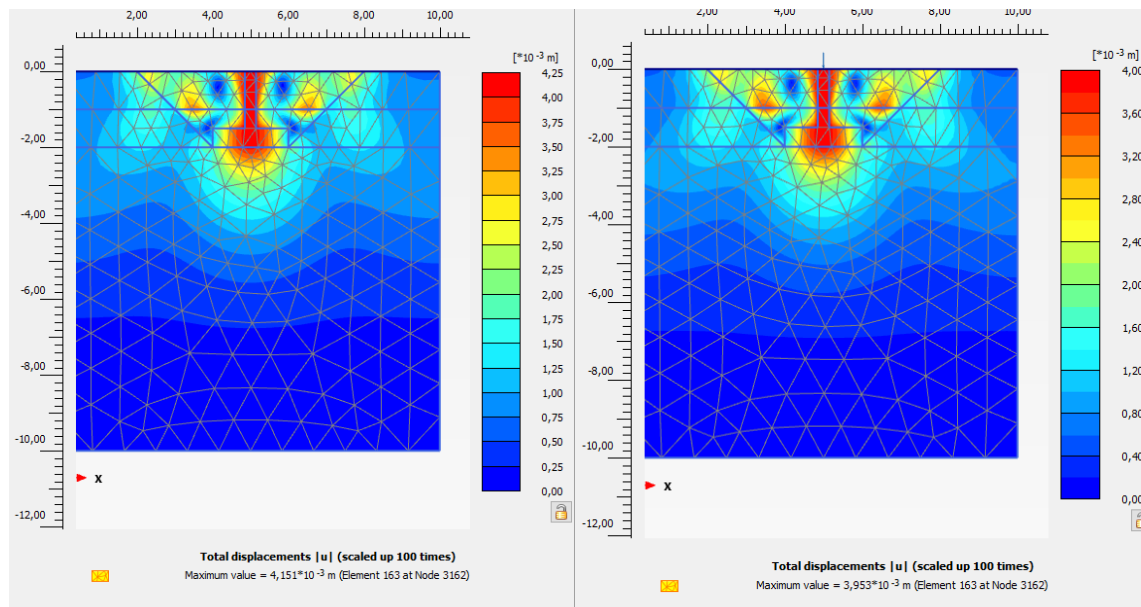


Figura 10. Etapa de Relleno y Construcción de Zapata y Etapa de Carga.

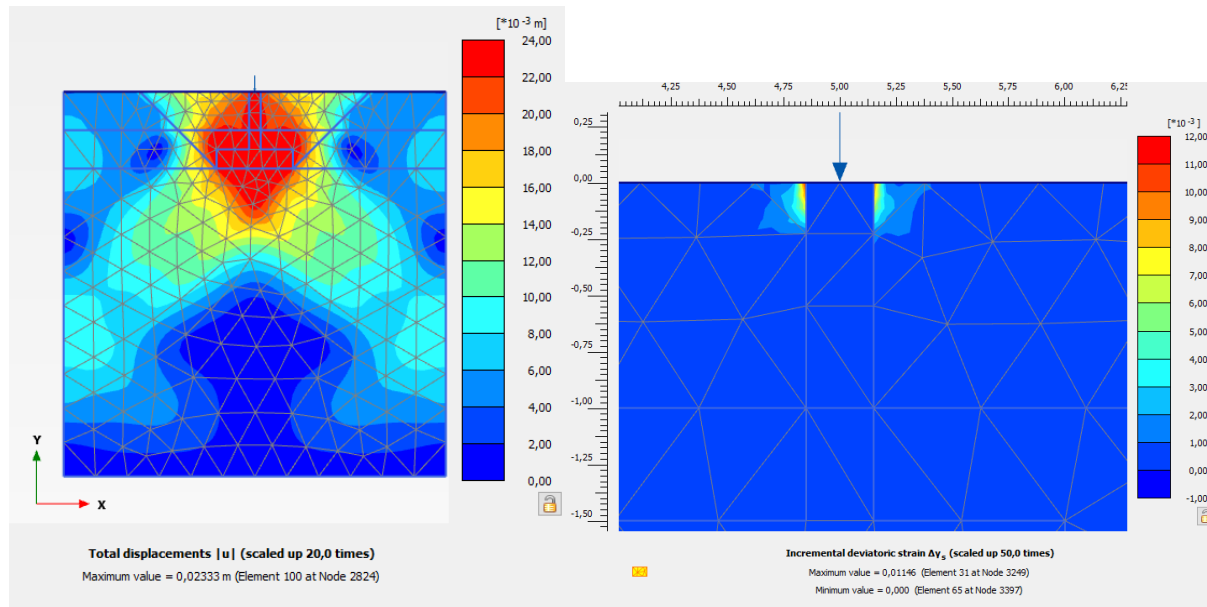


Figura 11. Análisis de seguridad de suelo Insitu y Mejorado.

CONCLUSIONES

Se realizó una investigación orientada a evaluar la estabilización de suelos cohesivos mediante la sustitución parcial con escoria de acero en los siguientes porcentajes de 0%, 20%, 40% y 50%. A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados, se identificaron mejoras significativas en las propiedades geotécnicas del suelo, lo que permitió formular las siguientes conclusiones:

- (a) De los Límites de Atterberg, se determinó que la calicata C1 presenta suelos de naturaleza arcillosa con características de plasticidad media a alta (IP entre 14.40% y 25.49%), clasificados como CH, CL y SC según (SUCS), y dentro de los grupos A-6 y A-7, lo cual indica una capacidad limitada como material de fundación, debido a su potencial expansión y alta compresibilidad, condición considerada desfavorable según los criterios establecidos en la NTP E 050, que desaconseja el uso de suelos de alta plasticidad en cimentaciones superficiales por su comportamiento volumétrico inestable. En la calicata C2 predominan suelos con índices de plasticidad superiores al 35% (IP hasta 42.12%), clasificados como CH, lo que también representa una condición crítica para cimentaciones, conforme con la misma norma. La calicata C3 sigue esta misma tendencia con suelos CH y clasificación A-7-6, reafirmando su escasa aptitud geotécnica para soportar cargas estructurales. En contraste, la calicata C4 presenta suelos con baja o nula plasticidad (IP entre 7.93% y 0.97%), clasificándose como ML, CL y SC, pertenecientes al grupo A-4, con índices de grupo muy bajos (hasta 0), lo cual indica un comportamiento estable, siendo los más adecuados para cimentaciones superficiales de acuerdo con los lineamientos de la NTP E 050 y principios de la mecánica de suelos. Estos resultados se encuentran detallados en la Tabla 8.
- (b) Del ensayo de Proctor estándar se concluye que la incorporación de escoria de acero mejora notablemente las propiedades de compactación de suelos, como se muestra en la Tabla 9. En todas las calicatas se observa un aumento progresivo en la densidad seca máxima (MDD)

y una disminución en la humedad óptima (OMC) conforme se incrementa la sustitución de la escoria de acero. La calicata C4 presentó mejor comportamiento, alcanzando una MDD de 2.562 mg/cm³ y una OMC mínima de 9.80%, lo que evidencia una mayor compactación. Los resultados demuestran que la escoria de acero, hasta en un 50%, contribuye significativamente a mejorar el desempeño de los suelos para fines de cimentación.

- (c) Con base a los resultados del ensayo de resistencia a la compresión no confinada presentados en la Tabla 10, se concluye que la incorporación de la escoria de acero mejora significativamente la cohesión del suelo en todas las calicatas. En particular, la calicata C1 mostró el mayor incremento, pasando de 0.172 kg/cm² (sin escoria de acero) a 4.702 kg/cm² con una sustitución de 50% de escoria de acero, lo que indica que este residuo siderúrgico actúa como estabilizante y mejora el comportamiento mecánico de los suelos cohesivos.
- (d) De la capacidad de carga obtenido mediante el método de Terzaghi, aplicando la ecuación correspondiente para zapatas rectangulares y cuadradas según la Tabla 16, se observa un incremento sustancial en la capacidad portante del suelo tras un proceso de estabilización. El suelo en su condición natural, la capacidad de carga admisible (q_{adm}) se encuentra en el rango de 147.81 kPa a 160.27 kPa según la Tabla 17. Esta variación refleja el efecto favorable del tratamiento del terreno, al mejorar sus propiedades resistentes y su desempeño mecánico, permitiendo así una mayor eficiencia estructural en cimentaciones superficiales.
- (e) Con base en los parámetros geotécnicos obtenidos de acuerdo a la Tabla 18 y 19, modelados en el software Plaxis 2D, se concluye que la sustitución del 50% de escoria de acero en el suelo cohesivo, mejora notablemente el comportamiento deformacional del suelo cohesivo. Esta mejora se evidencia en el módulo de Young de 450 a 2160 kN/m², el módulo edométrico de 540 a 2592 kN/m² y la resistencia al corte no drenado de 52.10 a 323. kN/m², lo que indica un suelo más rígido, con menor tendencia a la deformación y mayor capacidad para soportar cargas. La simulación numérica permitió evaluar el efecto del mejoramiento del terreno.

REFERENCIAS

- Brand, A. S., Singhvi, P., Fanijo, E. O., & Tutumluer, E. (2020). Stabilization of a clayey soil with ladle metallurgy furnace slag fines. *Materials*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/MA13194251>
- Espinosa, A. B., López-Ausín, V., Fiol, F., Serrano-López, R., & Ortega-López, V. (2023). Analysis of the deformational behavior of a clayey foundation soil stabilized with ladle furnace slag (LFS) using a finite element software. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.721>
- Kabeta, W. F., & Lemma, H. (2023). Modeling the application of steel slag in stabilizing expansive soil. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(4), 4023-4030. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01734-1>

- Mahedi, M., Cetin, B., & Dayioglu, A. Y. (2019). *Leaching behavior of aluminum, copper, iron and zinc from cement activated fly ash and slag stabilized soils*. *Waste Management*, 95, 334-355. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.018>
- Manso, J. M., Ortega-López, V., Polanco, J. A., & Setién, J. (2013). *The use of ladle furnace slag in soil stabilization*. *Construction and Building Materials*, 40, 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.079>
- Preetham, H. K., Nayak, S., & Surya, E. V. (2019). *Experimental investigation on the stabilization of soft clay using granulated blast furnace slag*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 561(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012047>
- Varaprasad, B. J. S., Joga, J. R., & Joga, S. R. (2020). *Reuse of Municipal Solid Waste from Incinerated Ash in the Stabilization of Clayey Soils*. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 28(4), 1-7. <https://doi.org/10.2478/sjce-2020-0024>
- Zhang, Y., Liu, C., Zhang, Y., Wu, X., Zhang, F., Zhang, J., & Li, X. (2024). *The mechanical strength, microstructure, and transport properties of steel slag reinforced loess soil system*. *Case Studies in Construction Materials*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02702>
- Brand, A. S., Singhvi, P., Fanijo, E. O., & Tutumluer, E. (2020). *Stabilization of a clayey soil with ladle metallurgy furnace slag fines*. *Materials*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/MA13194251>
- Espinosa, A. B., López-Ausín, V., Fiol, F., Serrano-López, R., & Ortega-López, V. (2023). *Analysis of the deformational behavior of a clayey foundation soil stabilized with ladle furnace slag (LFS) using a finite element software*. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.721>
- Kabeta, W. F., & Lemma, H. (2023). *Modeling the application of steel slag in stabilizing expansive soil*. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(4), 4023-4030. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01734-1>
- Mahedi, M., Cetin, B., & Dayioglu, A. Y. (2019). *Leaching behavior of aluminum, copper, iron and zinc from cement activated fly ash and slag stabilized soils*. *Waste Management*, 95, 334-355. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.018>
- Manso, J. M., Ortega-López, V., Polanco, J. A., & Setién, J. (2013). *The use of ladle furnace slag in soil stabilization*. *Construction and Building Materials*, 40, 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.079>
- Preetham, H. K., Nayak, S., & Surya, E. V. (2019). *Experimental investigation on the stabilization of soft clay using granulated blast furnace slag*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 561(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012047>

- Varaprasad, B. J. S., Joga, J. R., & Joga, S. R. (2020). Reuse of Municipal Solid Waste from Incinerated Ash in the Stabilization of Clayey Soils. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 28(4), 1-7. <https://doi.org/10.2478/sjce-2020-0024>
- Zhang, Y., Liu, C., Zhang, Y., Wu, X., Zhang, F., Zhang, J., & Li, X. (2024). The mechanical strength, microstructure, and transport properties of steel slag reinforced loess soil system. *Case Studies in Construction Materials*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02702>
- Leiva Vidal, D., & Montenegro Cooper, J. (2017). Caracterización de un suelo arcilloso y su mezcla con escoria blanca proveniente de la siderurgia integral [Tesis de pregrado, Universidad Católica de la Santísima Concepción]. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. Wiley.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). Norma Técnica E.050: Suelos y cimentaciones. Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing (40th ed.)*. AASHTO.
- American Society for Testing and Materials. (2021). *Annual book of ASTM standards*. ASTM International.
- ASTM International. (2021). ASTM D1557-12(2021): Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)). ASTM International. <https://cdn.standards.iteh.ai>
- ASTM International. (2006). ASTM D2166-06: Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. ASTM International. <http://www.astm.org>
- ASTM International. (2020). ASTM D2435/D2435M-11(2020): Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. ASTM International. <https://standards.iteh.ai>
- ASTM International. (2016). ASTM D422: Standard test method for particle-size analysis of soils (Withdrawn). ASTM International. <https://static1.squarespace.com>
- ASTM International. (2006). ASTM D2216-06: Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2216-19>
- ASTM International. (2018). ASTM D4318-18: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>
- ASTM International. (2017). ASTM D2487-17: Standard practice for soil classification for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International. <https://blog.ansi.org>

