

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de escoria de
acero y caucho reciclado en cimentaciones de la provincia de
Espinar**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autores:

Jorge Luis Quispe Alcca

Roy Armando Nina Infa

Asesor:

Mtro. Leonel Chahuares Paucar

Juliaca, junio de 2026

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mtro. Leonel Chahuares Paucar, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS MEDIANTE EL USO DE ESCORIA DE ACERO Y CAUCHO RECICLADO EN CIMENTACIONES DE LA PROVINCIA DE ESPINAR”** de los autores **Jorge Luis Quispe Alcca** y **Roy Armando Nina Infa** tiene un índice de similitud de 10% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 18 días del mes de junio del año 2026.



Mtro. Leonel Chahuares Paucar

Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 17 día(s) del mes de junio del año 2026, a las 11:15 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Mg. Herson Duberly Pari Luis

el (la) secretario(a): Msc. Eder

Mamani Shambi

y los demás miembros: Dr. Edwin Parillo Escarona

y el (la) asesor(a) Mtro. Leonel Gshahuares Pausar

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

Estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de escoria de acero y caucho reciclado en cimentaciones de la provincia de Espinar

del(los) bachiller(es): a) Jorge Luis Quispe Alcca

b) Roy Armando Kina Infa

c)

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Civil

(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Jorge Luis Quispe Alcca

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (b): Roy Armando Kina Infa

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
Presidente/a

[Firma]
Asesor/a

[Firma]
Bachiller (a)

[Firma]
Miembro

[Firma]
Bachiller (b)

[Firma]
Secretario/a

Miembro

Bachiller (c)

Índice de Contenido

Resumen:	5
Abstract:	5
1.Introducción.....	6
2.Materiales y métodos.....	7
2.1. Métodos – Propiedades Físicas Y Mecánicas.....	7
2.2. Materiales	8
2.2.1. Extracción de material	8
2.2.2. Arcilla	9
2.2.4. Escoria de acero	10
3.Resultadosexperimentales y análisis.....	10
3.1. Puntos de extracción de muestras	10
3.2. Resumen de resultados – Propiedades Físicas.....	13
3.3. Resumen de resultados – Propiedades Mecánicas.....	16
3.3.1. Proctor estándar	16
3.3.2. Resistencia a la compresión no confinada	18
3.3.3. Corte directo	21
3.3.4. Capacidad portante	23
3.3.5. Ensayo de consolidación unidimensional	23
3.3.6. Análisis estadístico de los resultados	24
4. Discusión	24
5. Conclusiones y comentarios	26
Referencias	27
Anexos	28

Estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de escoria de acero y caucho reciclado en cimentaciones de la provincia de Espinar

Jorge Luis Quispe Alcca¹, Roy Armando Nina Infa²

¹ Escuela profesional de Ingeniería Civil, Universidad Peruana Unión, Perú; jorgeluisquispe@upeu.edu.pe

² Escuela profesional de Ingeniería Civil, Universidad Peruana Unión Perú; roy.nina@upeu.edu.pe

* Correspondencia: jorgeluisquispe@upeu.edu.pe

Recibió: **Aceptado:** **Publicado:**

Cita: Jorge Q., Roy N., (2025). Estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de escoria de acero y caucho reciclado en cimentaciones de la provincia de Espinar. Revista de la Construcción. Revista de Construcción, 21(1), 407-410. <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.3.407>.

Resumen:

Los suelos arcillosos presentan baja resistencia, alta plasticidad y limitada capacidad portante, lo que compromete el comportamiento de las cimentaciones. En este contexto, la investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la escoria de acero y del caucho reciclado en la estabilización de suelos arcillosos de la provincia de Espinar, con el fin de mejorar sus propiedades geotécnicas. Se usó una metodología de tipo aplicada, se realizaron ensayos de caracterización física y mecánica conforme a normas NTP y ASTM, empleando escoria de acero en proporciones de 10, 20, 30, 35, 40 y 45 %, caucho reciclado en 10, 15, 20 y 30 %, y mezclas de ambos materiales en 10, 15, 20 y 30 %. La evaluación incluyó los ensayos de Proctor estándar, compresión no confinada, corte directo y el cálculo de la capacidad portante admisible mediante la teoría de Terzaghi. Los resultados mostraron que la escoria de acero presentó el mejor desempeño, al incrementar la densidad seca máxima de 1.03 a 1.55 g/cm³, reducir el límite líquido de 89.66 a 55.14 % y el límite plástico de 53.36 a 25.92 %, y elevar la resistencia a la compresión simple de 1.22 a 3.52 kg/cm². El hallazgo más relevante fue el aumento de la capacidad portante admisible de 1.42 kg/cm² en el suelo natural a 4.20 kg/cm² con 40 % de escoria, mientras que el caucho reciclado al 10 % y el material mixto al 10 % alcanzaron 2.18 y 2.95 kg/cm², respectivamente. Se concluye que la escoria de acero al 40 % fue el estabilizante más eficaz.

Palabras clave: Escoria de acero, Caucho reciclado, Estabilización, Cimentaciones, suelo arcilloso.

Abstract:

Clayey soils exhibit low strength, high plasticity, and limited bearing capacity, which compromises foundation performance. In this context, the objective of this research was to evaluate the effect of steel slag and recycled rubber on the stabilization of clayey soils in the province of Espinar in order to improve their geotechnical properties. An applied methodology was used, physical and mechanical characterization tests were carried out according to NTP and ASTM standards, using steel slag contents of 10, 20, 30, 35, 40, and 45%, recycled rubber contents of 10, 15, 20, and 30%, and mixtures of both materials at 10, 15, 20, and 30%. The evaluation included Standard Proctor, unconfined compression, direct shear, and allowable bearing capacity calculated using Terzaghi's theory. The results showed that steel slag achieved the best performance, increasing maximum dry density from 1.03 to 1.55 g/cm³, reducing the liquid limit from 89.66 to 55.14% and the plastic limit from 53.36 to 25.92%, and increasing unconfined compressive strength from 1.22 to 3.52 kg/cm². The most relevant finding was the increase in allowable bearing capacity from 1.42 kg/cm² in the natural soil to 4.20 kg/cm² with 40% steel slag, whereas 10% recycled rubber and 10% mixed material reached 2.18 and 2.95 kg/cm², respectively. It is concluded that 40% steel slag was the most effective stabilizer.

Keywords: Steel slag, Recycled rubber, Stabilization, Foundations, Clayey soil.

1. Introducción

El problema abordado en este estudio tiene que ver con la importancia de los suelos arcillosos en la construcción, ya que su baja resistencia al corte y su alta compresibilidad hacen necesario que los ingenieros adopten un método de estabilización adecuado para cumplir con las propiedades de ingeniería requeridas, debido a que estos suelos generan limitaciones en la construcción por su alta plasticidad y baja capacidad portante (Miraki et al., 2022).

En el barrio Villa Meza, distrito y provincia de Espinar, Cusco, los estudios de suelos con fines de cimentación son fundamentales para toda obra de infraestructura. Se trata de una zona con marcada actividad minera, donde opera la Compañía Minera Antapaccay y existe una red de empresas locales vinculadas al sector. En este contexto, la elección de materiales alternativos como el caucho reciclado y la escoria de acero responde a la disponibilidad de residuos y subproductos industriales generados por esta dinámica productiva. Por ello, ante el crecimiento urbano y la construcción de nuevas edificaciones, resulta necesario aplicar soluciones eficaces y sostenibles para estabilizar suelos cohesivos, ya que su carácter expansivo puede afectar la seguridad, durabilidad y costos de mantenimiento de las estructuras.

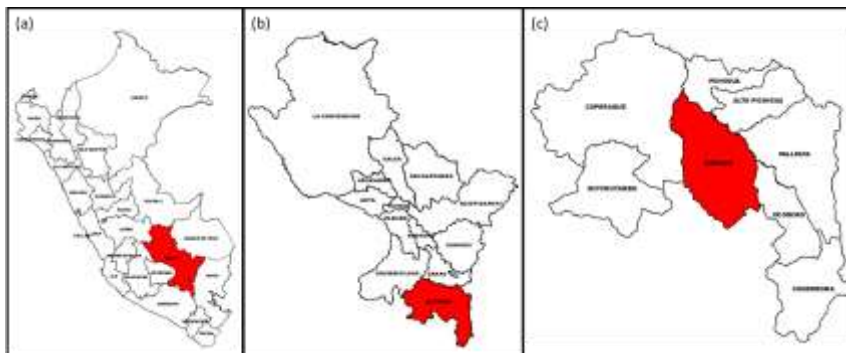


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio: (a) Mapa del Perú, (b) Mapa Regional, (c) Mapa Provincial.

La estabilización del suelo desempeña un papel esencial en la construcción y el diseño de cimientos al permitir la mejora de la durabilidad del suelo y las propiedades mecánicas del suelo. Entre los materiales reciclados destacados se encuentran las escorias de acero y el caucho reciclado. Estos materiales están ampliamente disponibles y son conocidos por su potencial para mejorar la resistencia y la capacidad portante de los suelos de arcilla. La escoria de acero, por ejemplo, tiene la capacidad de promover una estructura más densa y estable, logrando un aumento en la densidad seca y una disminución de la plasticidad, además de mejorar la compactación y la resistencia mecánica del suelo (Kabeta & Lemma, 2023). Sin embargo, cabe señalar que el número de investigaciones que estudian los efectos de estos materiales sobre suelos de arcilla es relativamente pequeño para la provincia de Espinar.

La combinación del aumento de la población y el crecimiento de las industrias ha generado una inquietud a nivel global por el control adecuado de los diferentes tipos de residuos urbanos y de construcción. La tonelada anual de residuos de construcción y demolición es un problema masivo y difícil para muchos países. En este contexto, se están implementando sistemas diseñados para gestionar de manera óptima los residuos, reduciendo el impacto negativo en el medio ambiente y aumentando la sostenibilidad en todo el mundo (Varaprasad et al., 2020).

Investigaciones previas han establecido que existen muchas opciones para estabilizar suelos de arcilla. La adición de escoria de acero, por ejemplo, ha demostrado un aumento en la resistencia mecánica y la durabilidad del suelo. Los suelos con escoria de acero añadida (Kabeta & Lemma, 2023) y los suelos modificados con caucho (Akbarimehr et al., 2020) han sido estudiados. La expansión de la arcilla puede reducirse con caucho modificado, estabilizando los suelos de arcilla. El caucho reciclado puede ayudar con la fragilidad del suelo modificado. Dado que el caucho es flexible y menos hidratado, puede ayudar a reducir los cambios de volumen del suelo.

En la reutilización de residuos como materiales estabilizadores en la construcción, existe potencial para reducir los costos de construcción debido al menor impacto en el medio ambiente y a la optimización de recursos (Ujile & Abbey, 2022). Se considerará el impacto potencial en la construcción y las cimentaciones de edificios debido a la corrosión química y la humedad al usar materiales estabilizadores en la construcción (Li et al., 2023). Cuando se usan con moderación, la escoria de acero puede ayudar a proporcionar densidad y mejorar la capacidad portante de los suelos de arcilla cuando se combina con caucho para ayudar a la arcilla con su fragilidad.

Existe un buen potencial en materiales estabilizadores en caucho y escoria de acero, pero ofrecen efectos significativamente diferentes. La escoria metálica es densa y angular, mientras que el caucho es flexible (y a diferencia de la espuma, deformable). Ambos proporcionan efectos potencialmente buenos para los suelos como recursos de construcción. Aunque ambos materiales han mostrado resultados favorables en suelos arcillosos, es necesario analizar su comportamiento para verificar su idoneidad en proyectos viales y de cimentación, especialmente en términos de estabilidad, resistencia y capacidad portante, aspecto de gran importancia en la ingeniería geotécnica (KUMAR et al., 2020).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la escoria de acero y el caucho reciclado en suelos arcillosos en las cimentaciones de la provincia de Espinar. En este estudio se evaluó el efecto de la escoria de acero y el caucho reciclado como materiales para estabilizar suelos arcillosos.

2. Materiales y métodos

2.1. Métodos – Propiedades Físicas Y Mecánicas

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y nivel explicativo-comparativo, ya que evaluó numéricamente cómo la escoria de acero y el caucho reciclado modifican las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso respecto al estado natural. El diseño fue experimental de laboratorio, y la unidad de análisis estuvo conformada por muestras obtenidas de cuatro calicatas del barrio Villa Meza, en Espinar.

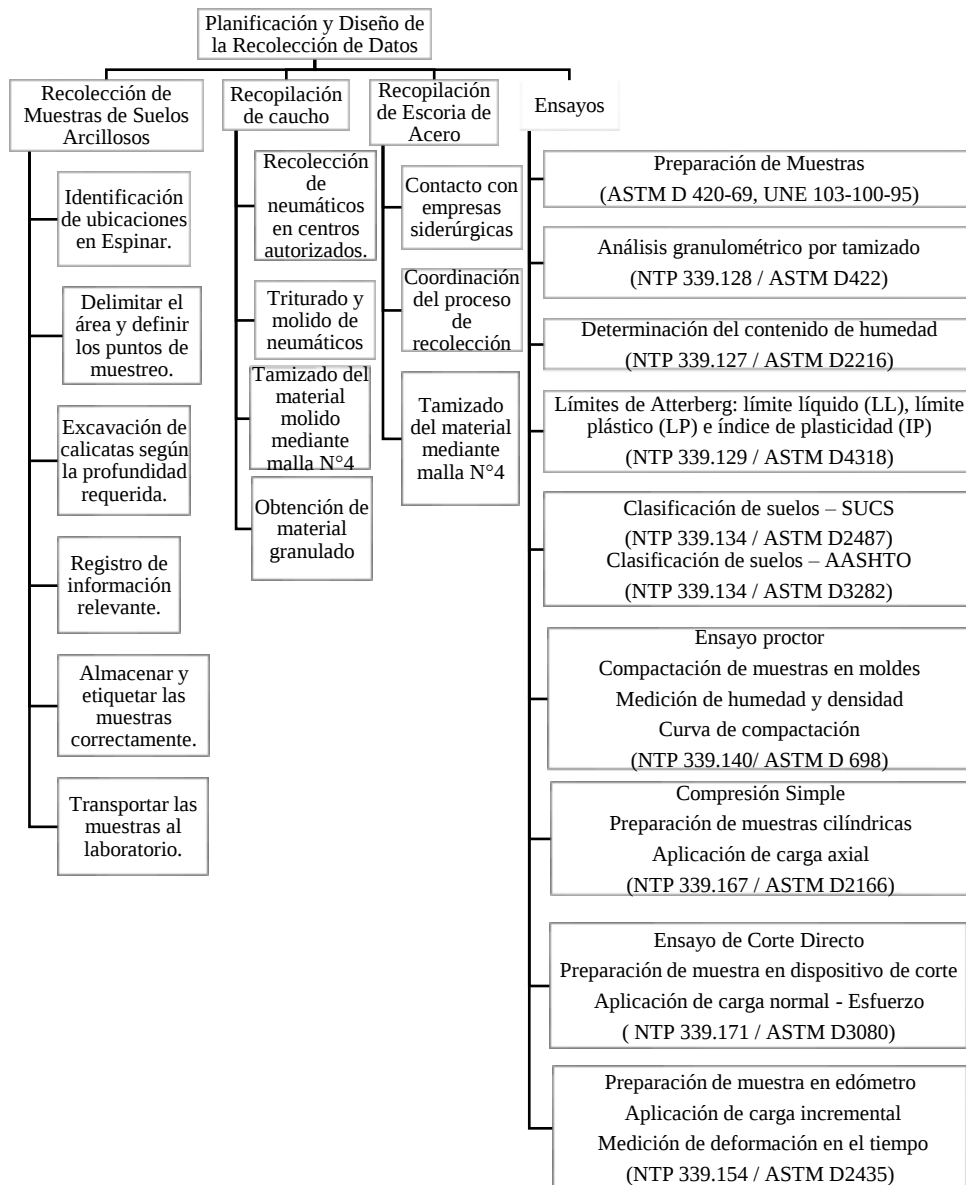


Figura 2. Diagrama de flujo de los ensayos físicos y mecánicos.

Tabla 1. Normativa de ensayos utilizados.

Ensayo	Norma NTP	Norma ASTM
Propiedades físicas		
Análisis granulométrico de suelos por tamizado	NTP 339.128	ASTM D422
Determinación del contenido de humedad de un suelo	NTP 339.127	ASTM D2216
Límite líquido (LL), Límite plástico (LP) e Índice de plasticidad (IP)	NTP 339.129	ASTM D4318
Clasificación de suelos método SUCS	NTP 339.134	ASTM D2487
Clasificación de suelos método AASHTO	NTP 339.134	ASTM D3282
Propiedades mecánicas		
Compresión simple	NTP 339.167	ASTM D2166
Proctor estándar	NTP 339.140	ASTM D 698
Corte directo	NTP 339.171	ASTM D3080
Consolidación	NTP 339.154	ASTM D2435

2.2. Materiales

2.2.1. Extracción de material

Se comparó el suelo natural con muestras estabilizadas mediante tres tipos de combinación: escoria de acero en proporciones de 10, 20, 30, 35, 40 y 45 %, caucho reciclado en 10, 15, 20 y 30 %, y mezclas de ambos en 10, 15, 20 y 30 %. Estos porcentajes fueron seleccionados para evaluar distintos niveles de dosificación e identificar el contenido óptimo de estabilizante sin afectar negativamente la compactación ni las propiedades mecánicas del suelo.

Para la evaluación de compactación se empleó el ensayo Proctor estándar, utilizando la energía de compactación correspondiente a dicho método, de acuerdo con la norma ASTM D698 y su equivalente NTP 339.140, por ser adecuada para comparar el comportamiento del suelo natural y de las mezclas estabilizadas bajo una condición controlada de laboratorio.

El ensayo de corte directo se realizó en condición consolidada no drenada (CU). Las muestras fueron previamente consolidadas bajo los esfuerzos normales aplicados y luego sometidas al corte sin permitir el drenaje durante la etapa de falla.

Asimismo, se empleó el ensayo de compresión simple no confinada para evaluar la variación de la resistencia del suelo arcilloso ante la incorporación de estabilizantes. Aunque este ensayo es más representativo en suelos cohesivos, en la presente investigación se utilizó con fines comparativos para identificar la tendencia de mejora o disminución de la resistencia en las mezclas, complementando su interpretación con los resultados de corte directo y compactación, especialmente en las dosificaciones con mayor contenido de escoria de acero.

Para la validación de los resultados experimentales se empleó estadística descriptiva. En los ensayos mecánicos, cada condición fue evaluada con $n = 3$ repeticiones, y los resultados fueron expresados mediante media aritmética y desviación estándar, a fin de identificar la tendencia central y la dispersión de los datos. En el análisis comparativo entre el suelo natural y las mezclas estabilizadas se consideró el valor promedio como representativo del tratamiento correspondiente.

Tabla 2. El porcentaje de sustitución es válido para ensayos físicos y mecánicos.

Muestra	% de adición de escoria de acero						% de adición de caucho reciclado				Mixto (Caucho + Escoria, 50/50) (%)			
C-01	10%	20%	30%	35%	40%	45%	10%	15%	20%	30%	10%	15%	20%	30%
C-02	10%	20%	30%	35%	40%	45%	10%	15%	20%	30%	10%	15%	20%	30%
C-03	10%	20%	30%	35%	40%	45%	10%	15%	20%	30%	10%	15%	20%	30%
C-04	10%	20%	30%	35%	40%	45%	10%	15%	20%	30%	10%	15%	20%	30%

2.2.2. Arcilla

Las muestras de arcilla que fueron objeto de estudio, recolectadas en la provincia de espinar, departamento de cusco, Perú.



Figura 3. Perfil estratigráfico de la calicata y extracción de la arcilla.

Para que un suelo pueda considerando arcilloso tiene que cumplir una serie de criterios fijos los cuales se detallan la tabla

Tabla 3. Características de suelo arcilloso

Criterio	Parámetro	Condición para considerarlo arcilloso
Clasificación textural	Tamaño de partícula	La fracción arcilla corresponde a partículas menores de 0.002 mm.
Clasificación textural	Porcentaje de arcilla, arena y limo	Un suelo es clase textural arcilla si tiene $\geq 40\%$ de arcilla, $< 45\%$ de arena y $< 40\%$ de limo.
Clasificación geotécnica	% que pasa tamiz N.º 200	Para entrar al grupo de suelos finos, debe tener $\geq 50\%$ de finos pasando el tamiz N.º 200 (0.075 mm).
Límites de Atterberg	Índice plástico (IP o PI)	$PI = LL - PL$.
Carta de plasticidad (USCS)	Relación LL-PI	El suelo se considera de comportamiento arcilloso si el punto queda sobre la A-line, cuya ecuación es $PI = 0.73(LL - 20)$.
Tipo de arcilla por plasticidad	Límite líquido (LL)	Si está sobre la A-line y $LL < 50$, se clasifica como CL; si está sobre la A-line y $LL \geq 50$, como CH.
Criterio vial orientativo	AASHTO	Los grupos más claramente arcillosos son A-6 y A-7; el A-7-6 corresponde a comportamiento más arcilloso, con $\geq 36\%$ pasando N.º 200, $LL \geq 41$, $PI \geq 11$ y $PI > LL - 30$.

2.2.3. Caucho reciclado

La obtención y recolección de caucho reciclado se llevó a partir de los desechos que abundan en la zona de estudio el cual es el departamento de Cusco orientando en aquellos materiales que han sido generado por el desgaste y descarte de neumáticos proveniente de automóviles, motocicletas maquinarias, etc. Por otro lado, el proceso de reciclaje tuvo etapas de recolección y clasificación, para realizar los ensayos la muestra tuvo que pasar por la malla N° 4.



Figura 4. Recolección y clasificación, caucho reciclado pasante malla N°4.

2.2.4. Escoria de acero

La adquisición del material se llevó a cabo en empresas vinculadas al rubro metalúrgico e industrial, donde este se genera como subproducto del proceso de fundición. Luego, el material fue sometido a un proceso de trituración para reducir su tamaño y homogeneizarlo. Posteriormente, para asegurar la uniformidad de las partículas, se realizó un proceso de clasificación utilizando la malla N.º 4.



Figura 5. Obtención de escoria de acero, proveniente de acerías.

Con la finalidad de complementar la caracterización de los materiales utilizados, se consideraron sus propiedades físicas básicas. El suelo natural presentó una gravedad específica de sólidos de 2.76 y una masa volumétrica total de 1.231 g/cm³. El caucho reciclado correspondió a un material fino pasante por la malla N.º 4, con partículas de forma irregular y comportamiento flexible, procedente del triturado de neumáticos fuera de uso. Por su parte, la escoria de acero fue empleada como material granular triturado, clasificado mediante la malla N.º 4, con partículas predominantemente angulares y de mayor rigidez.

Tabla 4. Propiedades físicas de los materiales empleados

Material	Procedencia	Tamaño o clasificación	Forma de partícula	Característica física relevante
Suelo arcilloso	Calicatas de Villa Meza, Espinar	Suelo fino cohesivo	Partículas finas	Gravedad específica de sólidos 2.76; masa volumétrica total 1.231 g/cm ³
Caucho reciclado	Neumáticos fuera de uso	Pasante malla N.º 4	Irregular, flexible	Material liviano, compresible y de baja afinidad con el agua
Escoria de acero	Subproducto de acerías	Pasante malla N.º 4	Angular, triturada	Material granular, denso y de mayor rigidez que el caucho

3. Resultados experimentales y análisis.

3.1. Puntos de extracción de muestras



Figura 6. Plano del terreno además de la ubicación de calicatas.

TABLA DE PERFIL ESTRATIGRAFICO CALICATA CP-01						
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS AROLLOSOS MEDIANTE EL USO DE ESCORIA DE ACERO Y CAUCHO RECICLADO EN CIMENTACIONES DE LA PROVINCIA DE ESPINAR"						CALICATA CP - 01 E: 239391.00 m E N: 8363572.00 m S
PROF. (m)	COTA (m.s.n.m.)	AASHTO	SUCS	ESPESOR	SIMBOLO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA
0.00	0.00					
0.10				0.40 m		TIPO DE SUELO:  ORGÁNICO COLOR MARRÓN
0.20						
0.30						
0.40						
0.50						
0.60						
0.70						
0.80						
0.90						
1.00						
1.10						
1.20						
1.30						
1.40						
1.50						
1.60						
1.70						
1.80						
1.90						
2.00						
2.10						
2.20						
2.30						
2.40						
2.50						
2.60						
2.70						
2.80						
2.90						
3.00						
3.10						
3.20						
3.30						
3.40						
3.50						

Tabla 5. Perfil estratigráfico del suelo C-01.

TABLA DE PERFIL ESTRATIGRAFICO CALICATA CP-02						
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS AROLLOSOS MEDIANTE EL USO DE ESCORIA DE ACERO Y CAUCHO RECICLADO EN CIMENTACIONES DE LA PROVINCIA DE ESPINAR"						CALICATA CP - 02 E: 239386.00 m E N: 8363572.00 m S
PROF. (m)	COTA (m.s.n.m.)	AASHTO	SUCS	ESPESOR	SIMBOLO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA
0.00	0.00					
0.10				0.60 m		TIPO DE SUELO:  RELLENO COLOR MARRÓN
0.20						
0.30						
0.40						
0.50						
0.60						
0.70						
0.80						
0.90						
1.00						
1.10						
1.20						
1.30						
1.40						
1.50						
1.60						
1.70						
1.80						
1.90						
2.00						
2.10						
2.20						
2.30						
2.40						
2.50						
2.60						
2.70						
2.80						
2.90						
3.00						
3.10						
3.20						
3.30						
3.40						
3.50						
3.60						

Tabla 6. Perfil estratigráfico del suelo C-02.

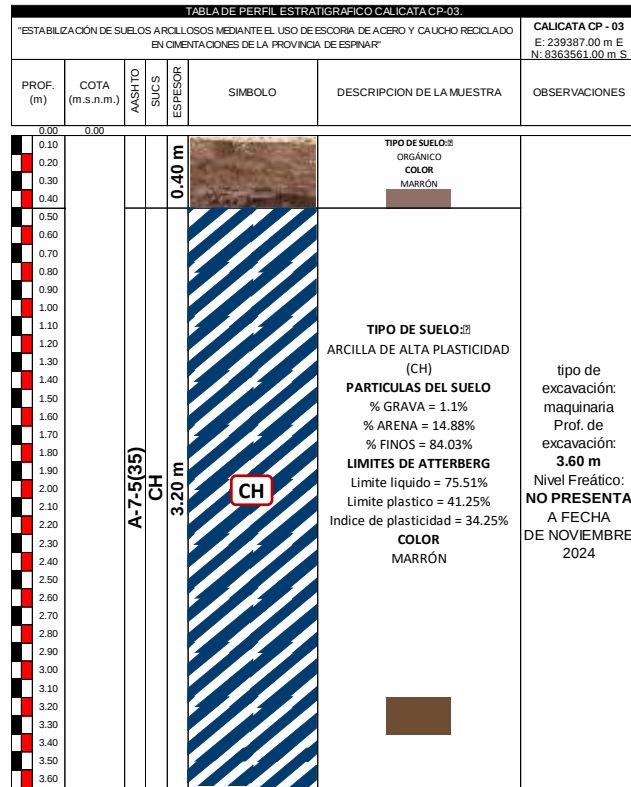


Tabla 7. Perfil estratigráfico del suelo C-03.

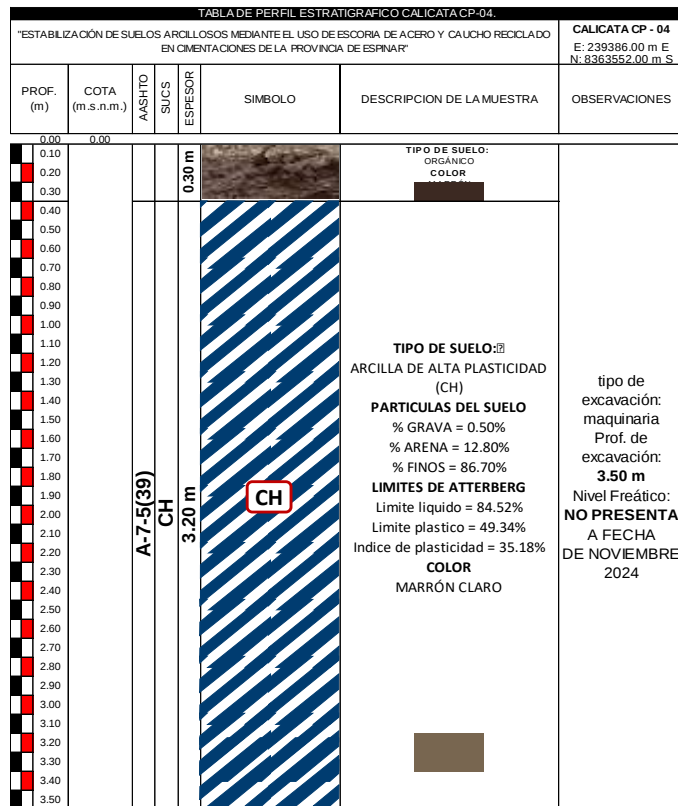


Tabla 8. Perfil estratigráfico del suelo C-04.

Ensayo	Humedad (%)	Densidad (gr/cm ³)	Granulometría (%)		Límites (%)			Clasif. (SUCS)	Clasif. (AASHTO)
			Pas. N° 40	Pas. N° 200	L.L	L.P	I.P		
Natural	56.64	1.15	95.9	84	75.51	41.25	34.25	CH	A-7-5(35)
10% - Escoria	-	-	84.1	78.8	75.07	41.13	33.94	MH	A-7-5(32)
20% - Escoria	-	-	75	69	73.12	42.56	30.56	MH	A-7-5(24)
30% - Escoria	-	-	68.3	63.4	66.46	38.53	27.93	MH	A-7-5(18)
35% - Escoria	-	-	62.49	53.12	57.96	28.39	29.57	CH	A-7-6(13)
40% - Escoria	-	-	57.57	48.87	54.63	27.7	26.93	CH	A-7-6(10)
45% - Escoria	-	-	52.66	44.62	47.17	26.23	20.94	CL	A-7-6(6)
10% - Caucho	-	-	79.2	68.2	83.25	53.61	29.64	MH	A-7-5(24)
15% - Caucho	-	-	76.5	66.5	79.22	47.41	31.81	MH	A-7-5(24)
20% - Caucho	-	-	73.8	64.8	75.19	41.21	33.98	MH	A-7-5(23)
30% - Caucho	-	-	65.6	55.8	NP	NP	NP	ML	A-4(0)
10% - Mixto	-	-	89.6	85.5	70.24	50.04	20.2	CH	A-7-5(24)
15% - Mixto	-	-	83.95	79.85	73.39	47.75	25.64	MH	A-7-5(27)
20% - Mixto	-	-	78.3	74.2	72.53	45.45	27.08	MH	A-7-5(24)
30% - Mixto	-	-	69.7	63.9	70.41	41.58	28.83	MH	A-7-5(19)

CALICATA - 04

Ensayo	Humedad (%)	Densidad (gr/cm ³)	Granulometría (%)		Límites (%)			Clasif. (SUCS)	Clasif. (AASHTO)
			Pas. N° 40	Pas. N° 200	L.L	L.P	I.P		
Natural	72.23	1.2	95	86.7	84.52	49.34	35.18	CH	A-7-5(39)
10% - Escoria	-	-	86.2	77.5	83.94	47.72	36.22	MH	A-7-5(34)
20% - Escoria	-	-	74.5	67.2	69.5	41.45	28.05	MH	A-7-5(21)
30% - Escoria	-	-	67.1	58.8	63.69	37.93	25.76	MH	A-7-5(14)
35% - Escoria	-	-	63.51	56.28	57.86	30.34	27.52	MH	A-7-5(13)
40% - Escoria	-	-	56.73	49.81	56.16	29.91	26.26	CH	A-7-6(10)
45% - Escoria	-	-	53.85	47.65	51.06	26.41	24.65	CH	A-7-6(8)
10% - Caucho	-	-	80	70.7	81.8	49.67	32.13	MH	A-7-5(27)
15% - Caucho	-	-	78.55	68.85	78	44.45	33.55	MH	A-7-5(26)
20% - Caucho	-	-	77.1	67	74.2	39.23	34.97	MH	A-7-5(25)
30% - Caucho	-	-	65.1	54.7	NP	NP	NP	ML	A-4(0)
10% - Mixto	-	-	88.1	83	85.46	50.13	35.33	MH	A-7-5(38)
15% - Mixto	-	-	83.8	78.75	81.67	47.23	34.44	MH	A-7-5(33)
20% - Mixto	-	-	79.5	74.5	77.87	44.33	33.54	MH	A-7-5(29)
30% - Mixto	-	-	67.9	62.3	71.08	41.28	29.8	MH	A-7-5(19)

De acuerdo con los resultados del suelo natural, las muestras corresponden a suelos arcillosos de alta plasticidad, ya que presentan altos porcentajes de material pasante por la malla N.º 200, elevados límites líquidos e índices de plasticidad, lo que coincide con su clasificación como CH según SUCS y A-7-5/A-7-6 según AASHTO. Esta condición justifica la necesidad de estabilización para fines de cimentación. En ese sentido, la reducción del límite líquido y del índice de plasticidad resulta favorable porque disminuye la compresibilidad y el potencial expansivo del suelo. La escoria de acero mostró una mejora más clara, al reducir la actividad de la fracción arcillosa mediante el aporte de partículas más densas y menos plásticas; en cambio, el caucho reciclado presentó un comportamiento más variable, ya que aunque en algunos casos disminuyó los límites de consistencia, en otros no logró estabilizar completamente la fracción activa del suelo.

En la figura 7, figura 8, figura 9 y figura 10 se observa los resultados de las calicatas confirman que la incorporación de caucho y escoria reduce de manera considerable el contenido de finos, siendo el caucho reduce más que la escoria, mientras que el mixto reduce ligeramente el fino.

En la figura 7, figura 8, figura 9 y figura 10 se observa la escoria genera la mayor reducción de los límites de consistencia, mientras que el caucho y el mixto producen una reducción ligera, destacando que con 30 % de caucho no presenta límites de consistencia.

En términos comparativos, la escoria mostró una mejora progresiva más clara entre 20% y 45%, mientras que el caucho presentó un efecto más moderado y variable, y el material mixto un comportamiento intermedio.

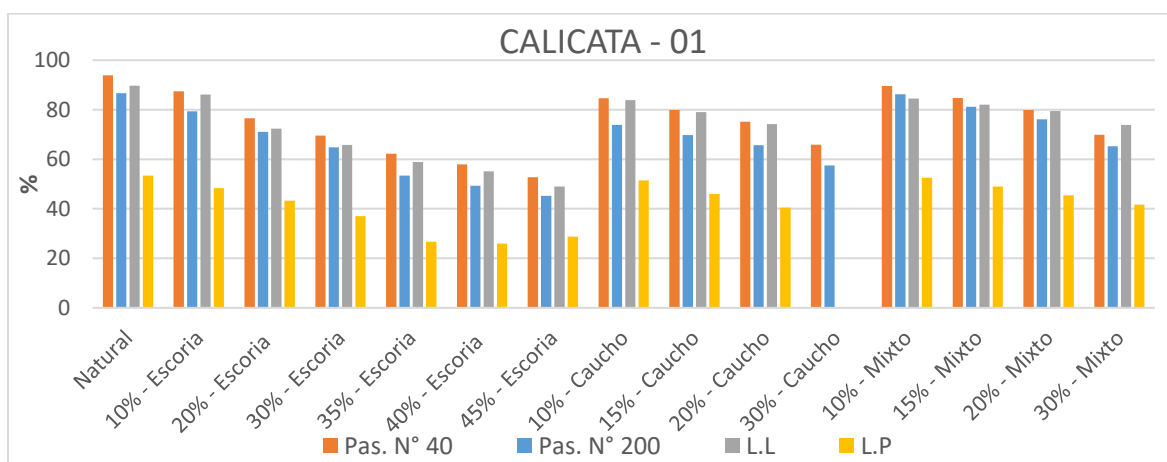


Figura 7. Gráfica comparativa de la Tabla 8 calicata - 01.

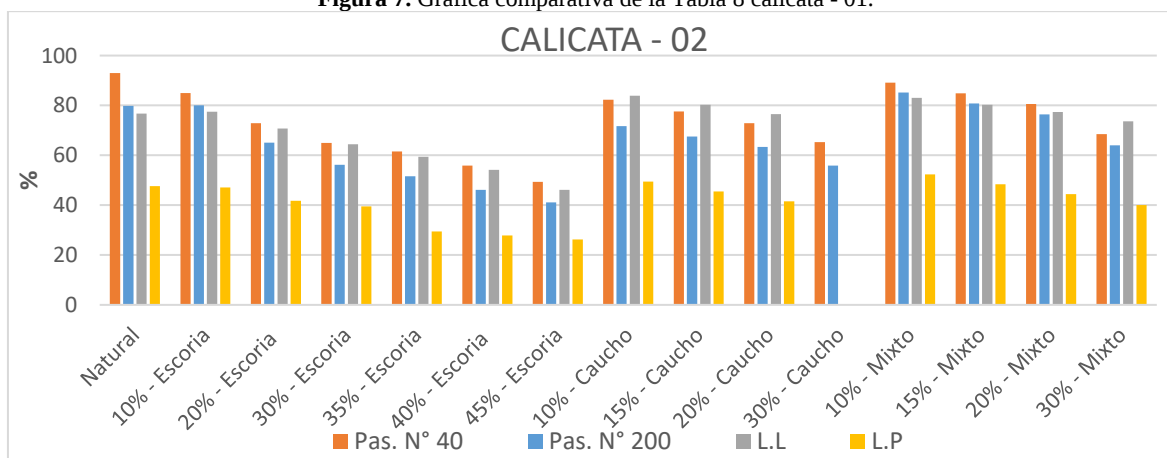


Figura 8. Gráfica comparativa de la Tabla 8 calicata - 02.

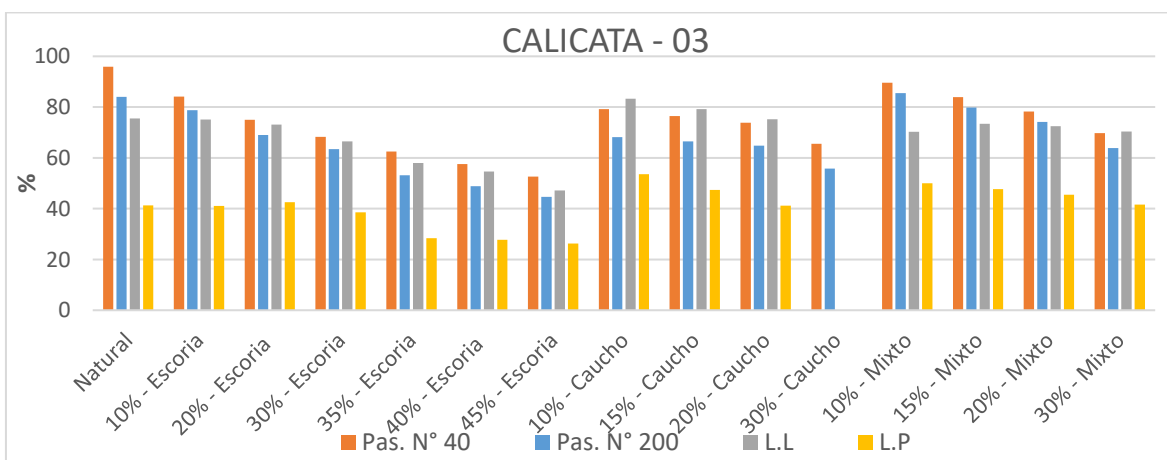


Figura 9. Gráfica comparativa de la Tabla 8 calicata - 03.

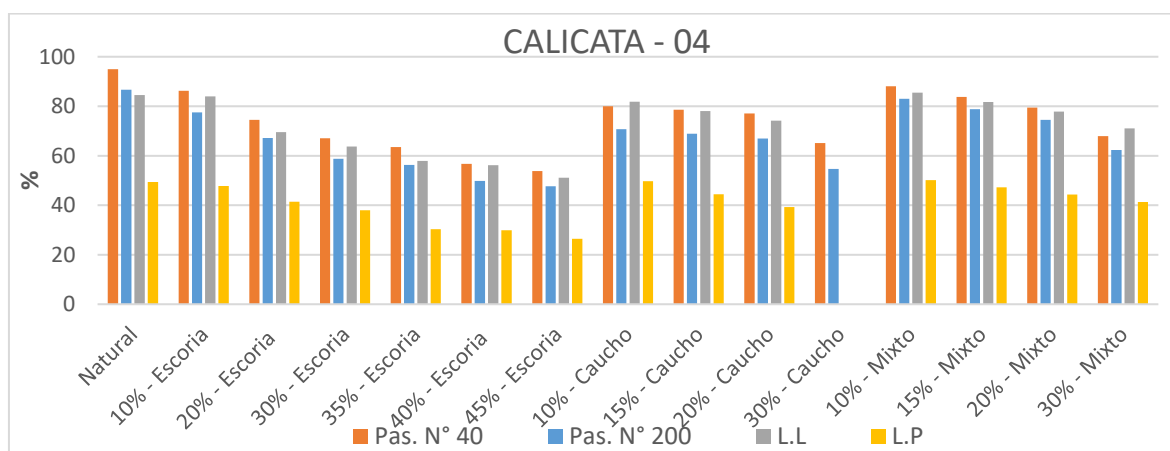


Figura 10. Gráfica comparativa de la Tabla 8 calicata - 04.

3.3. Resumen de resultados – Propiedades Mecánicas

3.3.1. Proctor estándar

En la tabla 9 se observa que el suelo natural presenta una máxima densidad seca de 1.03 gr/cm^3 en la calicata 1. Al incorporar caucho reciclado, se observa una disminución progresiva de la densidad, alcanzando valores de 0.96 gr/cm^3 con 10 %, 0.94 gr/cm^3 con 15 %, 0.93 gr/cm^3 con 20 % y 0.91 gr/cm^3 con 30 %. Esto se debe a que el caucho es un material ligero, lo que reduce la compactación limitando alcanzar mayores densidades. En el caso de mixto (caucho + escoria), la densidad aumenta ligeramente en comparación con el suelo natural, pasando de 1.06 gr/cm^3 con 10 % a 1.08 gr/cm^3 con 20 % y 1.13 gr/cm^3 con 30 %. Siendo que en el mixto la presencia de la escoria compensa el efecto del caucho, generando una ligera mejora en la densidad seca máxima. Finalmente, con la incorporación de escoria de acero, los resultados muestran un incremento significativo, registrando 1.07 gr/cm^3 con 10 %, 1.18 gr/cm^3 con 20 %, 1.32 gr/cm^3 con 30 %, 1.44 gr/cm^3 con 35 %, 1.55 gr/cm^3 con 40 % y alcanzando 1.60 gr/cm^3 con 45 %. Este aumento confirma que la escoria de acero es el aditivo más eficiente para mejorar la densidad seca del suelo.

En la tabla 9 se observa, el suelo natural en la calicata 1 presenta un óptimo contenido de humedad de 34.24 %, lo que evidencia un elevado requerimiento de agua para alcanzar su máxima compactación. Con la incorporación de caucho se observa una disminución progresiva del contenido de humedad, reduciéndose a 31.28 % con 10 %, a 31.05 % con 15 %, a 29.55 % con 20 % y alcanzando 28.45 % con 30 %, lo cual indica que el caucho contribuye a reducir el óptimo contenido de humedad. En el caso del mixto (caucho + escoria), reduce ligeramente a un 29.69 % con 10 %, 29.40 % con 15 %, 28.95 % con 20 % y finalmente 27.95 % con 30 %, reflejando que el mixto disminuye de manera constante el contenido de humedad óptimo. En el caso de incorporación de escoria de acero disminuye notablemente, de un 33.95 % con 10 %, a 31.50 % con 20 %, a 28.61 % con 30 %, llegando a un valor mínimo de 24.60 % con 40 %.

Tabla 10. Resultados de Proctor estándar.

CALICATA - 01			CALICATA - 02		
	Máxima densidad seca (gr/cm^3)	Óptimo contenido de humedad (%)		Máxima densidad seca (gr/cm^3)	Óptimo contenido de humedad (%)
Natural	1.03	34.24	Natural	1.04	33.90
10% - Caucho	0.96	31.28	10% - Caucho	0.94	29.70
15% - Caucho	0.94	31.05	15% - Caucho	0.93	30.20
20% - Caucho	0.93	29.55	20% - Caucho	0.92	30.50
30% - Caucho	0.91	28.45	30% - Caucho	0.91	30.80
10% - Mixto	1.06	29.69	10% - Mixto	1.06	30.72
15% - Mixto	1.08	29.40	15% - Mixto	1.07	31.77
20% - Mixto	1.08	28.95	20% - Mixto	1.08	28.25
30% - Mixto	1.13	27.95	30% - Mixto	1.10	26.36
10% - Escoria	1.07	33.95	10% - Escoria	1.10	31.98
20% - Escoria	1.18	31.50	20% - Escoria	1.20	30.25
30% - Escoria	1.32	28.61	30% - Escoria	1.34	28.95

35% - Escoria	1.44	25.70	35% - Escoria	1.42	25.35
40% - Escoria	1.55	24.60	40% - Escoria	1.50	25.45
45% - Escoria	1.60	25.00	45% - Escoria	1.56	24.65
CALICATA - 03			CALICATA - 04		
	Máxima densidad seca (gr/cm ³)	Optimo contenido de humedad (%)		Máxima densidad seca (gr/cm ³)	Optimo contenido de humedad (%)
Natural	1.04	33.44	Natural	1.03	33.70
10% - Caucho	0.94	30.98	10% - Caucho	0.94	30.06
15% - Caucho	0.97	29.90	15% - Caucho	0.93	29.08
20% - Caucho	0.92	29.70	20% - Caucho	0.93	31.90
30% - Caucho	0.92	29.28	30% - Caucho	0.92	29.55
10% - Mixto	1.05	37.05	10% - Mixto	1.05	31.10
15% - Mixto	1.07	28.07	15% - Mixto	1.07	31.77
20% - Mixto	1.08	34.65	20% - Mixto	1.07	27.80
30% - Mixto	1.12	31.52	30% - Mixto	1.11	27.05
10% - Escoria	1.06	33.08	10% - Escoria	1.07	33.25
20% - Escoria	1.17	32.49	20% - Escoria	1.18	31.08
30% - Escoria	1.33	28.48	30% - Escoria	1.37	27.90
35% - Escoria	1.45	25.85	35% - Escoria	1.44	25.28
40% - Escoria	1.52	24.68	40% - Escoria	1.49	25.80
45% - Escoria	1.56	23.40	45% - Escoria	1.57	24.00

El incremento de la densidad seca máxima con escoria de acero puede explicarse por su mayor peso específico y por la naturaleza angular de sus partículas, las cuales favorecen un mejor acomodo granular y una reducción de vacíos dentro de la matriz del suelo. Por ello, a medida que aumenta el contenido de escoria, la mezcla adquiere una estructura más densa y estable. En contraste, el caucho reciclado reduce la densidad seca máxima debido a su baja densidad y a su comportamiento deformable, que limita la compactación eficiente del material. El comportamiento del material mixto confirma esta interacción, ya que la escoria compensa parcialmente el efecto liviano del caucho, generando mejoras moderadas respecto al suelo natural.

Comparativamente, el mejor desempeño en compactación correspondió a la escoria entre 35% y 45%, mientras que el caucho mostró una disminución progresiva de densidad conforme aumentó su dosificación.

En la figura 11 se observa, el caucho disminuye la máxima densidad seca del suelo debido a que es ligero, mientras que el mixto logra una ligera mejora respecto al natural. Sin embargo, la escoria de acero presenta un incremento notable de la densidad y considerando la escoria más adecuada para la estabilización del suelo.

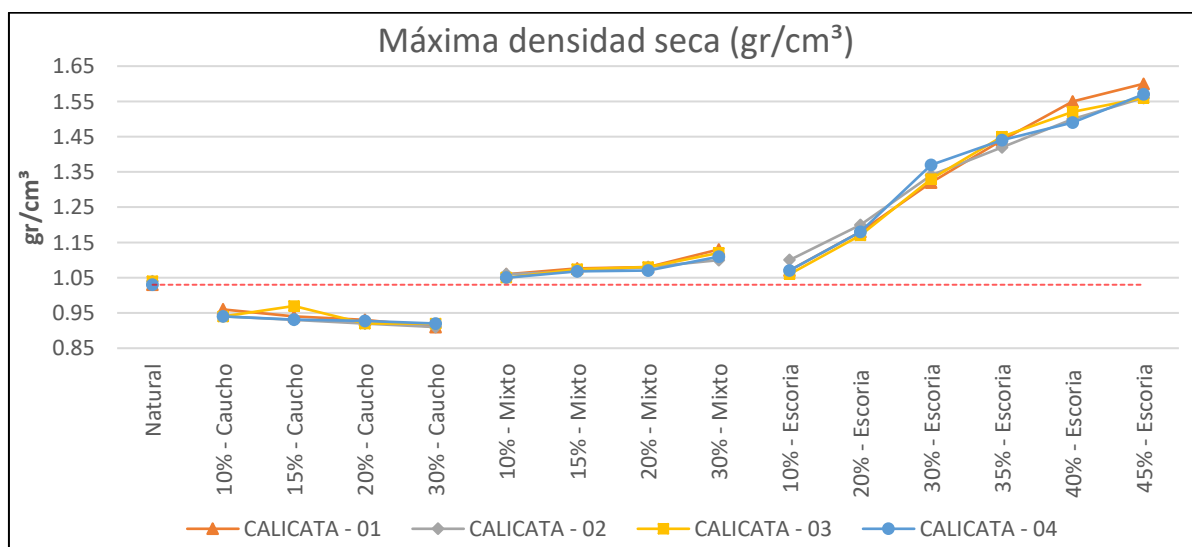


Figura 11. Gráfica comparativa de la Tabla 9.

En la figura 12 se observa, el suelo natural requiere un alto contenido de humedad para compactarse. El caucho y mixto disminuye la humedad de forma moderada, mientras que la escoria de acero disminuye notablemente la humedad, alcanzando los valores más bajos.

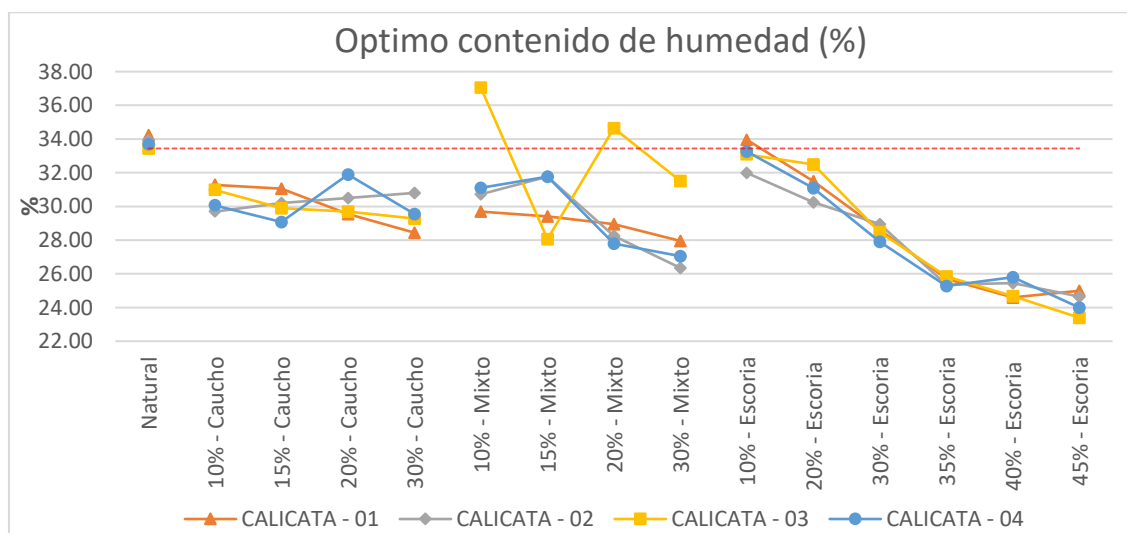


Figura 12. Gráfica comparativa de la Tabla 9.



Figura 13. Ensayo de Proctor estándar calicata – 01 suelo natural.

3.3.2. Resistencia a la compresión no confinada

En la tabla 10 se observa, el suelo natural presenta valores bajos de resistencia a la compresión 1.22 kg/cm^2 en la calicata 1. Con la adición de caucho se observa una mejora significativa en 10% a 1.90 kg/cm^2 , pero al aumentar a 15% los valores disminuyen a 1.46 kg/cm^2 , lo que evidencia que al 10% de adición de caucho es el óptimo. De manera similar, el material mixto alcanza su mejor comportamiento con 10% de adición a 2.18 kg/cm^2 , sin embargo, a partir de mayores porcentajes los valores empiezan a descender, lo que indica que al 10% es el óptimo. En el caso de la escoria presenta un desempeño mucho más favorable, ya que en todos los porcentajes incrementa los valores respecto al natural, aumentando desde el 10% con 2.37 kg/cm^2 hasta alcanzar un máximo con 40% de adición a 3.52 kg/cm^2 , aunque con 45% se aprecia una reducción a 2.99 kg/cm^2 , por lo que el óptimo sería al 40 % de adición de escoria.

Tabla 11. Resultados de compresión simple.

CALICATA - 01									
Ensayo					Esfuerzo de corte (C)				Resistencia a la compresión máxima (qu)
					Kg/cm²				Kg/cm²
Natural	0.65	0.55	0.63	0.61	1.30	1.11	1.26	1.22	
10% - Caucho	0.98	0.95	0.93	0.95	1.96	1.89	1.85	1.90	
15% - Caucho	0.73	0.71	0.75	0.73	1.47	1.42	1.49	1.46	
10% - Mixto	1.13	1.04	1.11	1.09	2.26	2.08	2.21	2.18	
15% - Mixto	0.75	0.83	0.86	0.81	1.50	1.66	1.71	1.62	
20% - Mixto	0.69	0.67	0.75	0.70	1.37	1.35	1.49	1.40	
30% - Mixto	0.55	0.51	0.58	0.55	1.10	1.02	1.17	1.10	

10% - Escoria	1.17	1.17	1.21	1.18	2.33	2.35	2.43	2.37
20% - Escoria	1.24	1.33	1.30	1.29	2.48	2.65	2.61	2.58
30% - Escoria	1.42	1.34	1.43	1.40	2.83	2.69	2.86	2.79
35% - Escoria	1.48	1.57	1.52	1.52	2.96	3.14	3.05	3.05
40% - Escoria	1.72	1.77	1.78	1.76	3.45	3.54	3.56	3.52
45% - Escoria	1.50	1.50	1.49	1.50	3.00	3.01	2.97	2.99
CALICATA - 02								
Ensayo				Esfuerzo de corte (C) Kg/cm ²				Resistencia a la compresión máxima (qu) Kg/cm ²
Natural	0.70	0.59	0.69	0.66	1.40	1.19	1.38	1.32
10% - Caucho	0.94	0.96	0.99	0.96	1.88	1.93	1.97	1.93
15% - Caucho	0.60	0.72	0.73	0.68	1.19	1.44	1.46	1.36
10% - Mixto	1.11	1.19	1.17	1.16	2.23	2.38	2.34	2.32
15% - Mixto	0.39	0.43	0.45	0.42	0.78	0.87	0.89	0.85
20% - Escoria	1.31	1.32	1.28	1.30	2.62	2.64	2.55	2.60
30% - Escoria	1.45	1.39	1.35	1.40	2.89	2.79	2.70	2.79
35% - Escoria	1.51	1.50	1.53	1.51	3.01	3.00	3.06	3.02
40% - Escoria	1.75	1.69	1.74	1.73	3.50	3.37	3.48	3.45
45% - Escoria	1.57	1.55	1.51	1.54	3.15	3.10	3.03	3.09
CALICATA - 03								
Ensayo				Esfuerzo de corte (C) Kg/cm ²				Resistencia a la compresión máxima (qu) Kg/cm ²
Natural	0.75	0.71	0.66	0.71	1.50	1.42	1.33	1.42
10% - Caucho	0.97	1.00	0.98	0.98	1.94	2.01	1.97	1.97
15% - Caucho	0.74	0.70	0.74	0.73	1.48	1.40	1.48	1.45
10% - Mixto	1.16	1.21	1.12	1.16	2.32	2.42	2.24	2.33
15% - Mixto	0.40	0.41	0.44	0.42	0.79	0.82	0.88	0.83
20% - Escoria	1.29	1.36	1.33	1.33	2.58	2.73	2.66	2.66
30% - Escoria	1.47	1.45	1.43	1.45	2.94	2.91	2.86	2.90
35% - Escoria	1.47	1.51	1.55	1.51	2.94	3.03	3.11	3.03
40% - Escoria	1.79	1.74	1.71	1.75	3.57	3.47	3.41	3.48
45% - Escoria	1.48	1.52	1.53	1.51	2.97	3.04	3.05	3.02
CALICATA - 04								
Ensayo				Esfuerzo de corte (C) Kg/cm ²				Resistencia a la compresión máxima (qu) Kg/cm ²
Natural	0.80	0.71	0.66	0.72	1.60	1.42	1.33	1.45
10% - Caucho	1.01	1.04	0.97	1.01	2.02	2.07	1.95	2.01
15% - Caucho	0.34	0.31	0.38	0.34	0.67	0.61	0.76	0.68
10% - Mixto	1.10	1.25	1.30	1.22	2.20	2.50	2.61	2.44
15% - Mixto	0.41	0.38	0.43	0.40	0.81	0.75	0.85	0.80
20% - Escoria	1.38	1.30	1.34	1.34	2.76	2.59	2.67	2.67
30% - Escoria	1.45	1.44	1.47	1.45	2.90	2.88	2.93	2.90
35% - Escoria	1.56	1.49	1.53	1.53	3.11	2.98	3.07	3.05
40% - Escoria	1.70	1.70	1.78	1.73	3.41	3.40	3.55	3.45
45% - Escoria	1.53	1.53	1.49	1.52	3.06	3.07	2.98	3.04

La disminución de la resistencia a compresión en mezclas con mayores porcentajes de caucho puede asociarse a la pérdida de continuidad de la matriz cohesiva del suelo. En bajas proporciones, el caucho puede contribuir a redistribuir esfuerzos y generar una mejora inicial; sin embargo, al incrementarse su contenido, predominan su baja rigidez y su carácter deformable, lo que reduce el contacto efectivo entre partículas del suelo y limita la transferencia de carga. Por el contrario, la escoria de acero incrementa progresivamente la resistencia debido a su aporte granular, a la mejora del empaquetamiento interno y a la reducción de vacíos, alcanzando su mejor respuesta alrededor del 40% de adición. La caída observada al 45% sugiere que, a

partir de ese contenido, el exceso de material estabilizante puede empezar a generar discontinuidades o una sustitución excesiva de la fracción cohesiva activa.

En términos comparativos, el contenido óptimo fue 10% para el caucho, 10% para el material mixto y 40% para la escoria de acero, evidenciando que cada estabilizante actúa de manera distinta sobre la resistencia del suelo.

En la figura 14, figura 15, figura 16 y figura 17 se observa el caucho y el material mixto mejoran la resistencia solo en porcentaje reducido siendo el 10% como optimo, mientras que la escoria mejora en porcentajes mayores, siendo el 40% de adición como optimo donde se alcanzan los mayores valores de compresión.

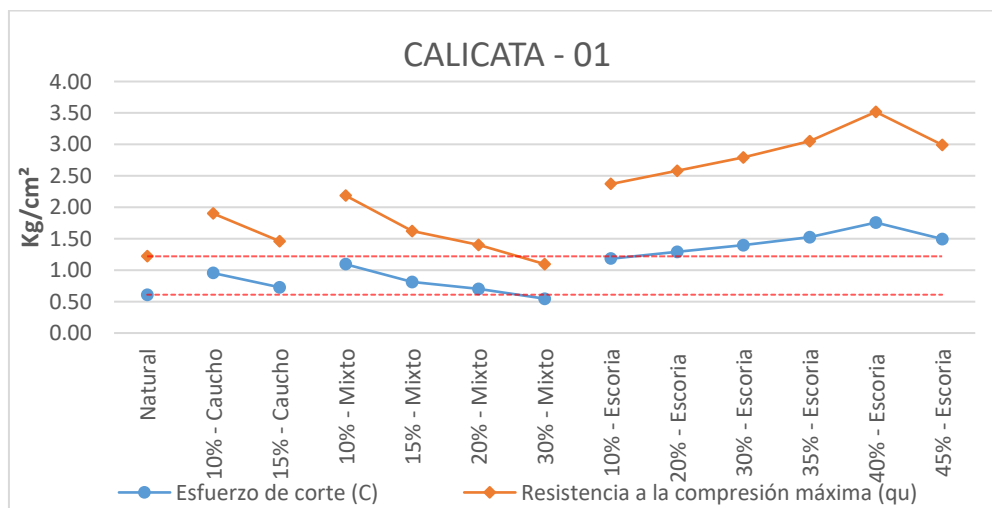


Figura 14. Gráfica comparativa de la Tabla 10.

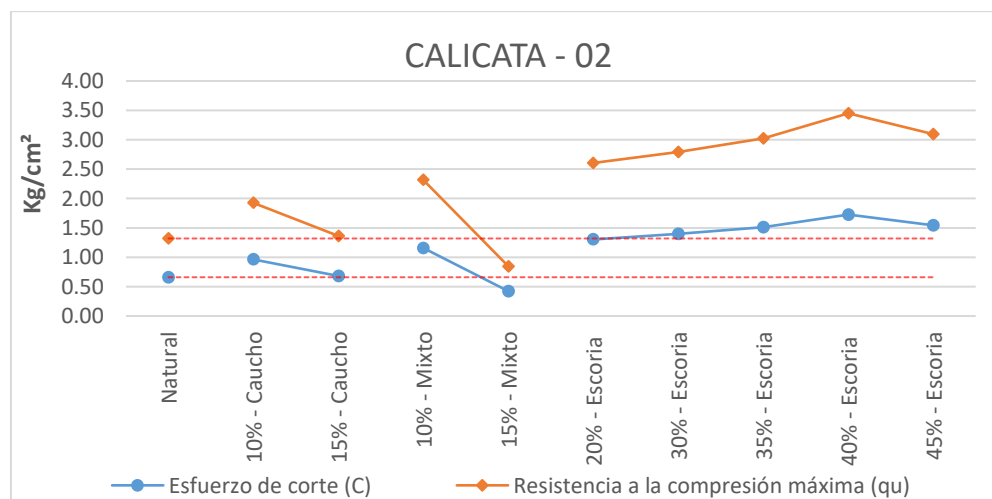


Figura 15. Gráfica comparativa de la Tabla 10.

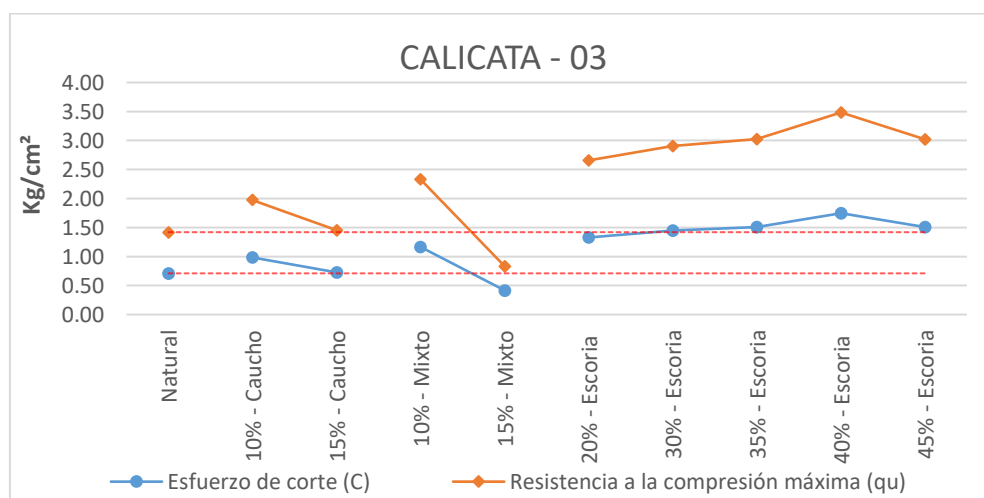


Figura 16. Gráfica comparativa de la Tabla 10.

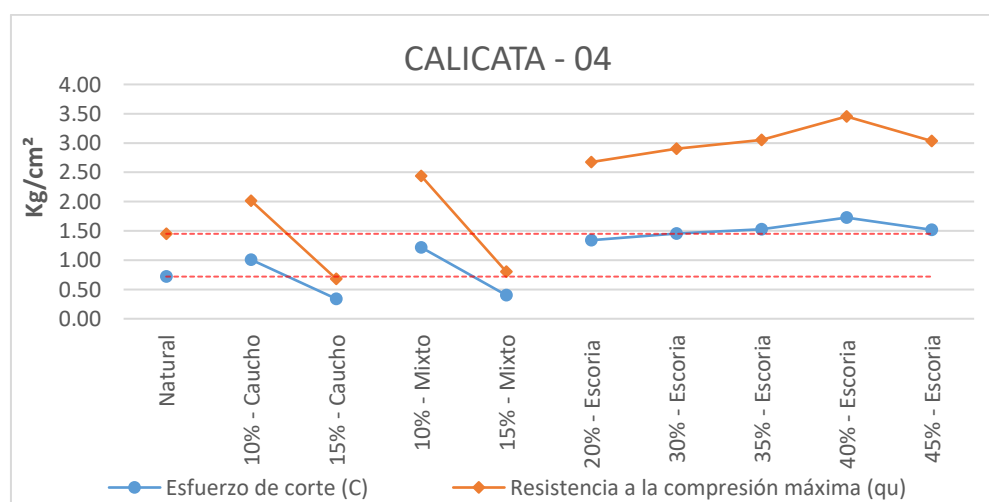


Figura 17. Gráfica comparativa de la Tabla 10.



Figura 18. Resultados del ensayo de compresión simple no confinada.

3.3.3. Corte directo

En la tabla 11 se observa, el suelo natural en la calicata 1 presenta valores bajos donde el ángulo de fricción es 12.92° y una cohesión de 0.27 kg/cm^2 . Con 10% de caucho se observa una mejora alcanzando 15.45° y 0.65 kg/cm^2 , mientras que con 10% de material mixto los valores aumentan a un más, llegando a 19.64° y 0.71 kg/cm^2 . Finalmente, la escoria al 40% alcanza los valores más altos con ángulo de fricción de 28.03° y una cohesión de 1.02 kg/cm^2 , lo que evidencia que es el estabilizante más óptimo para mejorar.

Tabla 12. Resultados de Corte directo.

	Natural		10% - Caucho		10% - Mixto		40% - Escoria	
	Angulo de fricción (ϕ)°	Cohesión (C) Kg/cm ²	Angulo de fricción (ϕ)°	Cohesión (C) Kg/cm ²	Angulo de fricción (ϕ)°	Cohesión (C) Kg/cm ²	Angulo de fricción (ϕ)°	Cohesión (C) Kg/cm ²
CALICATA - 01	12.92	0.27	15.45	0.65	19.64	0.71	28.03	1.02
CALICATA - 02	17.53	0.39	17.44	0.69	19.58	0.66	21.87	0.82
CALICATA - 03	15.93	0.34	17.96	0.54	20.5	0.67	23.28	0.8
CALICATA - 04	16.53	0.39	16.84	0.59	19.04	0.66	21.97	0.8

En la figura 19 y figura 20 se observa Los resultados muestran que el suelo natural en las calicatas 1, 2, 3 y 4 presenta valores bajos. La adición de caucho y material mixto mejora progresivamente tanto el ángulo de fricción como la cohesión, mientras que la escoria al 40% ofrece los valores más elevados siendo más optimo.

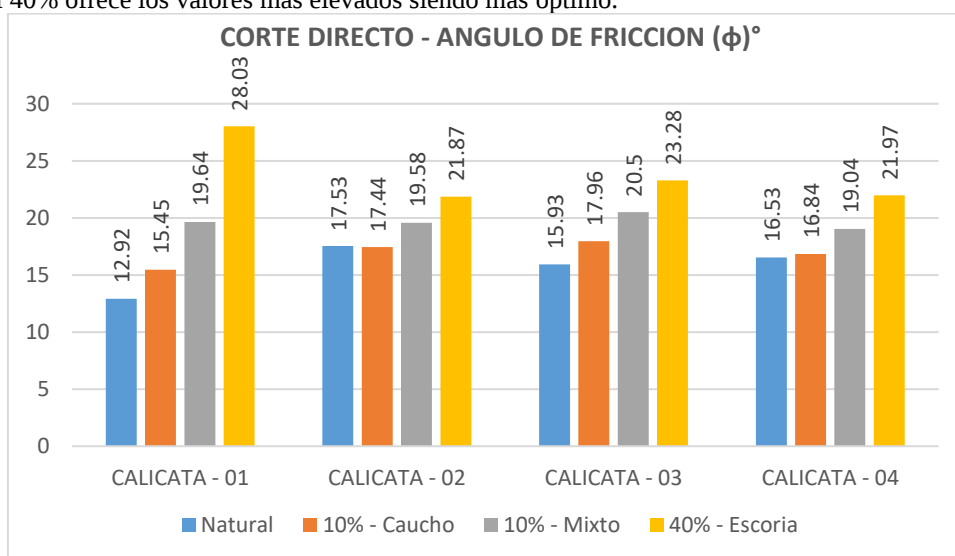


Figura 19. Gráfica comparativa de la Tabla 10.

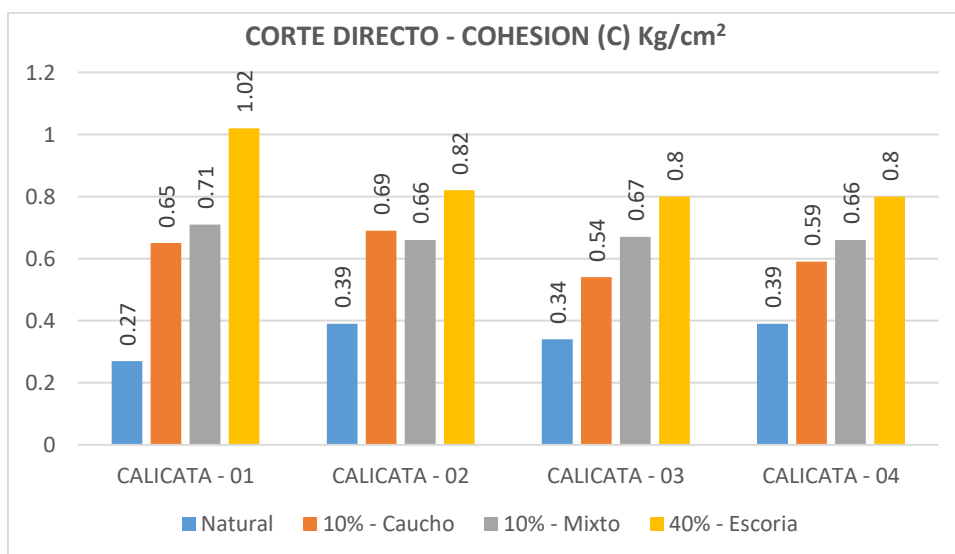


Figura 20. Gráfica comparativa de la Tabla 10.



Figura 21. Ensayo de Corte directo.

3.3.4. Capacidad portante

En la calicata 3 se determinó la capacidad portante del suelo utilizando la teoría de Terzaghi para cimentaciones superficiales, considerando una zapata de 1.20 m de ancho (B), una profundidad de desplante de 1.50 m (Df) y un factor de seguridad (FS) de 3.

Para la estimación de la capacidad portante admisible se empleó la ecuación de Terzaghi para cimentaciones superficiales, debido a que el estudio tuvo un propósito comparativo entre el suelo natural y los suelos estabilizados, manteniendo constantes la geometría de la zapata, la profundidad de desplante y el factor de seguridad. El uso de este modelo permitió evaluar el efecto de mejorar los parámetros resistentes del suelo en la capacidad portante, sobre la misma base teórica. Sin embargo, dado que se trata de un suelo de alta plasticidad, se reconoce que la ecuación de Terzaghi representa una simplificación, y la implementación final en un proyecto real debe complementarse con la verificación del posible tipo de falla, los asentamientos y los análisis específicos del drenaje y la rigidez del suelo estabilizado.

Tabla 13. Resultados de gravedad específica.

CALICATA 3	
	Gravedad específica (gr/cm ³)
Natural	2.786
10% - Mixto	2.730
10% - Caucho	2.636
40% - Escoria	3.790

En la Tabla 13, el suelo arcilloso natural no reforzado muestra un q_{adm} de 1.42 kg/cm², indicando una capacidad portante débil. Cuando se combina con caucho reciclado, el q_{adm} del suelo arcilloso reforzado con caucho es de 2.18 kg/cm², indicando una mejora moderada en la capacidad portante del suelo. Al emplear material mixto, el valor se incrementa hasta 2.95 kg/cm², evidenciando un resultado más ventajoso y con mayor estabilidad estructural. Finalmente, con la adición de escoria de acero se obtiene el máximo q_{adm} de 4.20 kg/cm², demostrando una capacidad portante significativamente superior, lo que convierte a este material en la alternativa más efectiva para la estabilización de suelos arcillosos en cimentaciones.

Tabla 14. Resultados de capacidad portante

	q_u (kg/cm ²)	q_{adm} (kg/cm ²)
NATURAL	4.26	1.42
10% CAUCHO	6.53	2.18
10% MIXTO	8.84	2.95
40% ESCORIA	12.61	4.20

3.3.5. Ensayo de consolidación unidimensional

Con el fin de evaluar la compresibilidad y el potencial de asentamiento del suelo arcilloso, se realizó el ensayo de consolidación unidimensional por carga incremental (método B), conforme a las normas ASTM D2435, MTC E 135 y NTP 339.154. El ensayo se aplicó al suelo natural y a tres mezclas representativas: 10 % de caucho reciclado, 10 % de mezcla caucho–escoria y 40 % de escoria de acero. A partir de las curvas de compresión se determinaron el índice de compresión (Cc) y el índice de recompresión (Cr) para comparar la deformabilidad del suelo natural y las mezclas estabilizadas.

Tabla 15. Resultados del ensayo de consolidación unidimensional

Tratamiento	Cc	Cr
Suelo natural	0.616	0.119
Caucho reciclado 10 %	0.203	0.095
Mixto 10 %	0.157	0.069
Escoria de acero 40 %	0.068	0.038

Los valores de Cc y Cr evidencian que la incorporación de estabilizantes disminuyó la compresibilidad del suelo arcilloso. La mayor reducción se obtuvo con 40 % de escoria de acero, seguida por el mixto 10 % y el caucho 10 %. En comparación con el suelo natural, la escoria redujo Cc en 89.0 % y Cr en 68.1 %, confirmando como la alternativa más eficiente para disminuir la deformabilidad del suelo.

3.3.6. Análisis estadístico de los resultados

Con el fin de evaluar la confiabilidad de los resultados experimentales, se aplicó estadística descriptiva al ensayo de compresión simple no confinada, considerando las tres repeticiones por tratamiento. Para cada condición se calcularon la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación, ya que este ensayo fue el que presentó de manera explícita las repeticiones necesarias para comparar la consistencia entre el suelo natural y las mezclas estabilizadas.

En general, los tratamientos estabilizados mostraron menor dispersión que el suelo natural, especialmente el 10 % de caucho reciclado y el 40 % de escoria de acero, lo que indica una respuesta más uniforme además de una mejora en la resistencia. De forma comparativa, la resistencia promedio fue de 1.35 kg/cm² en el suelo natural, 1.95 kg/cm² con 10 % de caucho, 2.32 kg/cm² con 10 % de mezcla y 3.48 kg/cm² con 40 % de escoria, equivalente a incrementos de 44.8 %, 71.5 % y 158.1 %, respectivamente. Asimismo, los coeficientes de variación del suelo natural fueron mayores que los de los tratamientos óptimos, confirmando que la escoria de acero al 40 % no solo presentó la mayor resistencia, sino también una mejora más consistente y reproducible y esto es visible en la tabla 15.

Tabla 16. Resumen estadístico del ensayo de compresión simple no confinada (qu)

Tratamiento	Promedio de medias de qu (kg/cm ²)	DE promedio (kg/cm ²)	CV promedio (%)
Suelo natural	1.35	0.11	8.11
10 % Caucho reciclado	1.95	0.05	2.51
10 % Mixto	2.32	0.12	5.05
40 % Escoria de acero	3.48	0.07	2.11

El análisis estadístico descriptivo confirma que la escoria de acero al 40 % fue el tratamiento más favorable, al registrar la mayor resistencia promedio y una dispersión reducida entre repeticiones. El 10 % de caucho reciclado y el 10 % de mezcla también mejoraron el comportamiento del suelo respecto al estado natural, aunque con menor magnitud. Por tanto, desde el punto de vista mecánico y estadístico, la escoria de acero presentó la respuesta más eficiente y confiable para la estabilización del suelo arcilloso evaluado.

4. Discusión

Los resultados del análisis granulométrico y de los límites de consistencia muestran que la incorporación de escoria de acero y caucho reciclado modificó de manera importante el comportamiento del suelo arcilloso. En las cuatro calicatas, el suelo natural presentó un alto contenido de finos y una plasticidad elevada, mientras que la adición de escoria redujo progresivamente el porcentaje pasante N.º 200 y disminuyó los valores de límite líquido e índice de plasticidad. Por ejemplo, en la calicata 1, el límite líquido descendió de 89.66 % en el suelo natural a 49.01 % con 45 % de escoria, mientras que el índice de plasticidad se redujo de 36.29 % a 20.26 %. Esta tendencia indica una menor actividad de la fracción arcillosa y una reducción del potencial de deformación volumétrica del suelo, lo cual resulta favorable para fines de cimentación. Este

comportamiento guarda relación con lo reportado por Kabeta y Lemma (2023), quienes señalaron que la escoria de acero modifica la microestructura del suelo expansivo y reduce su plasticidad, y con Zhang et al. (2023), quienes encontraron que la escoria mejora la textura del material y disminuye su compresibilidad. En el presente estudio, esta mejora puede atribuirse al reemplazo parcial de la fracción fina por partículas más granulares y densas, lo que genera una matriz menos plástica y más estable.

En el caso del caucho reciclado, también se observó una reducción del contenido de finos y una disminución parcial de los límites de consistencia, aunque su comportamiento fue menos uniforme que el de la escoria. Los resultados de los cuatro pozos de prueba indican una reducción en la plasticidad con la adición del 30% de caucho. Con la adición de caucho, los cuatro pozos de prueba de suelo pasaron a condición NP. Sin embargo, la reducción en la plasticidad no garantiza un aumento en el rendimiento mecánico del suelo. Este efecto puede atribuirse a que el caucho actúa más como un material blando, ligero, flexible y repelente al agua en lugar de un estabilizador de cemento. Por lo tanto, a diferencia del cemento, el caucho no formará enlaces químicos con el suelo, y los cambios en la estructura del suelo serán más atribuibles a la sustitución del material repelente al agua. Basándose en los hallazgos de Darwesh et al. (2025) y Akbarimehr et al. (2020), la adición de caucho reduce la plasticidad de las arcillas blandas. Además, el efecto de la adición de caucho en la plasticidad del suelo depende de la dosis y de las interacciones del caucho con el suelo consolidado. Según los resultados de los estudios, la adición de caucho sí reduce la plasticidad del suelo; sin embargo, la adición de caucho no mejora la plasticidad, resistencia y compactación del suelo. Por lo tanto, no mejora el rendimiento geotécnico general del suelo.

Según los resultados de la prueba de British Standard Proctor, el aditivo que mejoró la compactación fue escoria de acero. En la calicata 1, la densidad seca máxima aumentó de 1.03 g/cm³ en el suelo natural a 1.55 g/cm³ con 40 % de escoria y a 1.60 g/cm³ con 45 %, mientras que el contenido óptimo de humedad disminuyó de 34.24 % a 24.60 % y 25.00 %, respectivamente. Tendencias similares se observaron en las demás calicatas. Esta respuesta puede explicarse por el mayor peso específico y la naturaleza angular de la escoria, que favorecen un mejor empaquetamiento de partículas y una reducción del volumen de vacíos, permitiendo alcanzar mayores densidades con menor requerimiento de agua. Este comportamiento coincide con Zumrawi et al. (2022), quienes reportaron un incremento de densidad seca y una disminución de humedad óptima con la incorporación de escoria de acero. Desde el punto de vista geotécnico, un aspecto importante de este análisis es la consideración de la densidad seca. Una mayor densidad seca suele estar relacionada con la compactación, la deformabilidad reducida y una mayor capacidad para soportar cargas de la cimentación.

En cuanto a los otros materiales, la adición de caucho reciclado condujo a una reducción de la densidad seca máxima en todos los sondeos de prueba. Tomando como ejemplo el sondeo 1, la densidad se redujo de 1.03 g/cm³ a 0.96, 0.94, 0.93 y 0.91 g/cm³ con la adición de caucho del 10 al 30%. Aunque la masa de humedad óptima se redujo, la principal razón fue la pérdida de compactación. Esto se debe a la baja densidad del caucho y su alta deformabilidad, por lo que sustituye una parte de la fracción mineral del suelo, pero no mejora la rigidez. Esto también fue reportado por Talledo et al. (2023), quienes afirmaron que el caucho reduce la densidad seca máxima de suelos arcillosos, aunque sí mejora algunas propiedades mecánicas en proporciones bajas de caucho en el suelo. El estudio actual también respalda esta idea, que el caucho debe ser optimizado como modificador del suelo y no considerarse un potenciador de compactación del suelo.

Las diferencias entre estabilizadores fueron fácilmente observables en la resistencia a la compresión sin confinamiento. Se mostró que la escoria de acero mejora la resistencia a la compresión, con los resultados más altos en la adición del 40% de escoria. En el sondeo 1, la resistencia máxima del suelo natural fue de 1.22 kg/cm² y aumentó a 3.52 kg/cm² con la adición del 40% de escoria; en los sondeos restantes, los valores máximos oscilaron entre 3.45 y 3.48 kg/cm². Este incremento indica que la adición de escoria mejoró la estructura del suelo más allá de los cambios en la gradación y la plasticidad. La mejora de la estructura del suelo se atribuye a la combinación de los efectos de relleno y densificación con la distribución de esfuerzos mejorada en la mezcla. Los resultados de este estudio coinciden con los de Kabeta y Lemma (2023), y Zumrawi et al. (2022), quienes documentaron una mejora notable en la resistencia a la compresión sin confinamiento de suelos expansivos con la adición de escoria. A diferencia de los estudios mencionados anteriormente, se observó una ligera disminución más allá del 45%, lo que indica que hay un límite más allá del cual no se observa mejora y, de hecho, puede empeorar la estructura del suelo.

El caucho reciclado mostró un comportamiento diferente, mostrando una mejora con un 10% y luego la resistencia disminuyó con el aumento del porcentaje. En la fosa de prueba 1, la resistencia en suelo natural, que era de 1.22 kg/cm², fue de 1.90 kg/cm² con un 10% de caucho y disminuyó a 1.46 kg/cm² con un 15%. El mismo patrón se observa en las otras fosas de prueba, siendo la dosificación del 10% la más favorable. Esto significa que el caucho en pequeñas cantidades puede ayudar a redistribuir las tensiones y amortiguar la fragilidad del material. Sin embargo, en cantidades mayores, la baja rigidez y la alta deformabilidad del caucho limitan la transmisión de cargas axiales y la estabilidad de la matriz cohesiva del suelo. Los resultados muestran que la adición de caucho solo es útil cuando se usan pequeñas cantidades. Más allá de esto, se ha demostrado que en combinaciones de caucho con suelo arcilloso, el caucho puede usarse en cierta medida. Sin embargo, más allá de esto, las combinaciones de caucho con suelo arcilloso no mejoran la resistencia del suelo. Por lo tanto, el caucho en pequeñas cantidades puede usarse como un aditivo complementario para mejorar la resistencia en suelos arcillosos. Más allá de esta pequeña cantidad de aditivo en proporciones pequeñas, no cumple una verdadera finalidad.

Los resultados de las pruebas de corte directo apoyan esta evaluación. El suelo natural mostró baja cohesión y ángulos de fricción, pero se observaron mejoras con caucho y materiales mezclados, y la escoria al 40% mostró los mejores resultados

en todas las fosas de prueba. Por ejemplo, en la fosa de prueba 1, el ángulo de fricción mejoró de 12.92° en condiciones naturales a 28.03° con un 40% de escoria, mientras que la cohesión pasó de 0.27 a 1.02 kg/cm², ilustrando la mejora significativa en la resistencia al corte debido a la estructura más densa, un mejor anclaje de partículas y menor susceptibilidad al deslizamiento interno. La modesta mejora observada con caucho y mezclas también fue reportada por Emerson Villavicencio Aguirre (2024), quien señaló una mejora en la resistencia al corte con el uso de caucho reciclado, pero a expensas de la densidad seca. En este sentido, los resultados de la prueba de corte directo confirmaron que la escoria de acero es más efectiva que el caucho reciclado en el refuerzo de la resistencia al corte del suelo.

Según la prueba de consolidación, la compresibilidad se redujo junto con mejoras en la resistencia y capacidad portante a medida que el suelo se estabilizó. Al clasificar el suelo, se encontró que el suelo natural tenía alta plasticidad, y con ello, es apoyable decir que también era un suelo de alta compresibilidad, con tendencia a tener asentamientos elevados. En las pruebas de estabilización del suelo, se observó una tendencia decreciente en la compresibilidad y en el índice de hinchamiento, sugiriendo una estructura en equilibrio en desarrollo con menor potencial de deformación. La adición del 40% de escoria de acero estabilizó la muestra en mayor medida, ya que eso habría resultado en una mayor densidad de la muestra y en una reducción de vacíos en la muestra. Además, la arcilla fue parcialmente reemplazada por una partículas más rígidas y ásperas. La adición del tratamiento mixto al 10% también estabilizó positivamente la muestra, mientras que la adición del 10% de caucho solo estabilizó moderadamente la muestra, siendo menor que la estabilización proporcionada por la escoria. Los resultados también apoyan la idea de que en los cimientos de estructuras, la escoria proporciona resistencia al suelo y reduce el asentamiento potencial.

Finalmente, la capacidad portante también mostró mejoras físicas y mecánicas. El suelo natural tuvo un qadm de 1.42 kg/cm², mientras que el caucho reciclado al 10% aumentó esto a 2.18 kg/cm², el material mezclado al 10% a 2.95 kg/cm², y la escoria de acero al 40% a 4.20 kg/cm². Por lo tanto, la escoria de acero, en comparación con el suelo natural, triplicó la capacidad portante permitida, convirtiéndose en la mejor alternativa de estabilización. Esta respuesta se correlaciona con el aumento en la densidad seca, la resistencia a la compresión y los parámetros de corte. También coincide con Kabeta y Lemma (2023), quienes encontraron un aumento en la resistencia a la compresión y en el CBR de la escoria de acero, y con Mamani Paredes y Cusi Tutacano (2025), que demostraron una mejora en la capacidad de carga de suelos cohesivos con escoria de acero y una reducción del asentamiento. En cuanto al caucho, el modesto aumento en qadm está en línea con estudios previamente mencionados, donde se observó un efecto benéfico leve cuando se mantuvo en baja proporción; sin embargo, estas proporciones no alcanzan el nivel de rendimiento estructural de los estabilizadores minerales. Desde una perspectiva práctica, la escoria de acero al 40% es la opción más adecuada de los tratamientos considerados para suelos arcillosos en Espinar, utilizada para la construcción de suelos para edificaciones, mientras que el caucho reciclado y las mezclas pueden usarse como alternativas complementarias, considerando la sostenibilidad o una disminución menor de materias primas utilizadas.

5. Conclusiones y comentarios

La incorporación de estabilizantes modificó de manera significativa las propiedades físicas del suelo arcilloso. La escoria de acero mostró el mejor comportamiento global, reduciendo el contenido de finos y disminuyendo los límites de consistencia. En la calicata 1, el límite líquido descendió de 89.66 % en el suelo natural a 55.14 % con 40 % de escoria, mientras que el límite plástico disminuyó de 53.36 % a 25.92 %, lo que evidencia una reducción importante de la plasticidad y una mejora en la estabilidad del suelo frente a variaciones de humedad. Aunque el 45 % de escoria alcanzó la mayor densidad seca máxima en algunas calicatas, el 40 % presentó el mejor equilibrio entre compactación y resistencia mecánica.

En términos de compactación y resistencia, la escoria de acero fue el estabilizante más eficiente. En la calicata 1, la densidad seca máxima aumentó de 1.03 g/cm³ en el suelo natural a 1.55 g/cm³ con 40 % de escoria, mientras que la resistencia a la compresión no confinada se incrementó de 1.22 kg/cm² a 3.52 kg/cm². Asimismo, en el ensayo de corte directo, el ángulo de fricción interna aumentó de 12.92° a 28.03° y la cohesión de 0.27 kg/cm² a 1.02 kg/cm², confirmando que la escoria mejora de forma integral el comportamiento mecánico del suelo para fines de cimentación.

El ensayo de consolidación unidimensional evidenció que la estabilización redujo significativamente la compresibilidad del suelo arcilloso. El suelo natural presentó los mayores valores de Cc y Cr, mientras que la escoria de acero al 40 % registró los menores, constituyéndose en el tratamiento más eficaz para disminuir el potencial de asentamiento. El mixto al 10 % mostró una mejora importante y el caucho reciclado al 10 % una reducción moderada. En conjunto, estos resultados confirman que la escoria al 40 % mejora no solo la resistencia y la capacidad portante, sino también el comportamiento del suelo frente a asentamientos.

El caucho reciclado y el material mixto también mejoraron el comportamiento del suelo, pero en menor magnitud. El mejor resultado con caucho se obtuvo con 10 % de adición, con una capacidad portante admisible de 2.18 kg/cm², mientras que el material mixto alcanzó su mejor respuesta también con 10 %, obteniendo 2.95 kg/cm². Estos resultados muestran que ambos materiales generan una mejora moderada respecto al suelo natural, cuyo qadm fue de 1.42 kg/cm², aunque su desempeño fue inferior al alcanzado con la escoria de acero. En consecuencia, el porcentaje óptimo del caucho reciclado y del material mixto, dentro de las dosificaciones evaluadas, fue 10 %, mientras que el porcentaje óptimo global de la escoria de acero fue 40 %.

De manera integral, la escoria de acero al 40 % fue la dosificación más favorable del estudio, al registrar la mayor capacidad portante admisible, incrementando el q_{adm} de 1.42 kg/cm² en el suelo natural a 4.20 kg/cm². Esto indica que el suelo estabilizado con dicho porcentaje presenta condiciones geotécnicas notablemente más favorables para su uso en cimentaciones superficiales que la condición natural. No obstante, la aptitud definitiva del suelo para una cimentación específica debe verificarse en función de las cargas reales de diseño, tipo de estructura y condiciones particulares del proyecto.

Referencias

- Akbarimehr, D., Eslami, A., & Aflaki, E. (2020). Geotechnical behaviour of clay soil mixed with rubber waste. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122632. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.122632>
- Castillo, L., Amabilis Paredes Chura, G., Vanesa, M., & Gamarra Tuco Rubén Francisco, I. (2019). *Reforzamiento de Suelo Arcilloso con Caucho Reciclado para Fines de Cimentación en el Distrito de Yarabamba en la Ciudad de Arequipa*. Universidad Católica de Santa María. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/9102>
- Darwesh, H., Saker, F., Wahdan, A. H., & Elrefaey, M. M. (2025). Sustainability Evaluation of Using Waste Rubber in Treating Soft Clay Subgrades for Road Embankments. *The Egyptian International Journal of Engineering Sciences and Technology*, 0(0), 0–0. <https://doi.org/10.21608/EIJEST.2025.367959.1329>
- Emerson Villavicencio Aguirre. (2024). Mejoramiento del suelo empleando caucho reciclado para fines de cimentación, Ayacucho, 2023. *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/158680>
- 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/FIGURES/10>
- KUMAR, M. K., RAMAN, K. J., K.JEEVITHA, C.R.NIVEDHA, J.NANDHINI, KUMAR, M. K., RAMAN, K. J., K.JEEVITHA, C.R.NIVEDHA, J.NANDHINI, KUMAR, M. K., KUMAR, M. K., RAMAN, K. J., K.JEEVITHA, C.R.NIVEDHA, & J.NANDHINI. (2020). EXPERIMENTAL STUDY ON THE UTILIZATION OF FINE STEEL SLAG AND RUBBER CRUMBS ON STABILIZING HIGH PLASTIC SUBGRADE SOIL. *IJCRT - International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 8(4), 2779–2787. http://www.ijcrt.org/viewfull.php?p_id=IJCRT2004392
- Li, L., Zhang, H., Xiao, H., Pei, Y., & Wang, J. (2023). Mechanical and microscopic properties of alkali-activated fly-ash-stabilised construction and demolition waste. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(8), 2661–2677. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1792351>
- Mamani Paredes, V., & Cusi Tutacano, B. (2025). *Estabilización de suelos cohesivos incorporando escoria de acero con fines de cimentación utilizando un software*. Universidad Peruana Unión. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/9105>
- Miraki, H., Shariatmadari, N., Ghadir, P., Jahandari, S., Tao, Z., & Siddique, R. (2022). Clayey soil stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(2), 576–591. <https://doi.org/10.1016/J.JRMGE.2021.08.012>
- Talledo, B. C., David, K., Llanos, B., Alonso, M. O., Chilón, M., & Carmen, M. (2023). Evaluación de las Propiedades Mecánicas y Microestructurales del Suelo Arcilloso Adicionando Caucho Reciclado y Concha de Abanico Triturada. *Repositorio Institucional - USS*. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/11362>
- Thapa, I., Ghani, S., Kumari, S., & Choudhary, A. K. (2024). Utilizing Waste-Shredded Rubber Pieces for Improved Foundation Stability. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11(6), 3941–3968. <https://doi.org/10.1007/S40515-024-00443-1/METRICS>
- Ujile, M. C., & Abbey, S. J. (2022). The use of fine portions from construction and demolition waste for expansive soil stabilization: A review. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16(7), 803–816. <https://doi.org/10.1007/S11709-022-0835-Z/METRICS>
- Vaishnavi, V. S., Rao, B. N. D. N., Dumpa, V., & Rayi, C. S. (2024). Improvement of Low Compressible Clays Using Crumb Rubber. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 478 LNCE, 319–327. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1745-3_28
- 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., Jiang, T., Li, S., & Wang, W. (2023). Engineering Properties and Environmental Impact of Soil Mixing with Steel Slag Applied in Subgrade. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 1574, 13(3), 1574. <https://doi.org/10.3390/APP13031574>
- Zumrawi, M. M. E., Abdel-Aziz, A., & Babikir, A. (2022). Laboratory Study of Steel Slag Used for Stabilizing Expansive Soil. *University of Khartoum Engineering Journal*, 6(2), 30–35. <https://doi.org/10.53332/KUEJ.V6I2.1002>

Anexos

Anexo 1. Evidencia de Sumisión

103736 / Alcca et al. / Estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de escoria de acero y caucho reciclado en cimentaciones de la provincia de Esmeraldas [Library](#)

Workflow **Publication**

Submission **Review** Copyediting Production

Submission Files [Search](#)

File Name	Date	Type
235234-1 jorgeluisquispe, ARTICULO_JORGE_LUIS_ROMAN_ARMANDO.docx	April 15, 2026	Article Text

[Download All Files](#)

Pre-Review Discussions [Add discussion](#)

Name	From	Last Reply	Replies	Closed
Comments for the Editor	jorgeluisquispe	2026-04-15 02:29 AM	0	☐

[RDLC] Submission Acknowledgement [Resumir este correo electrónico](#)

CB Claudia Burbano-García <cpburbano@uc.cl>

Para: @jorgeluisquispe Mar 14/04/2026 22:13

Jorge Alcca:

Thank you for submitting the manuscript, "La Estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de escoria de acero y caucho reciclado en cimentaciones de la provincia de Esmeraldas: Suelos arcillosos mediante el uso de escoria de acero y caucho reciclado" to Journal of Construction. With the online journal management system that we are using, you will be able to track its progress through the editorial process by logging in to the journal web site:

Submission URL: <https://revistadelaconstruccion.uc.cl/index.php/RDLC/authorDashboard/submission/103736>
 Username: jorgeluisquispe

If you have any questions, please contact me. Thank you for considering this journal as a venue for your work.

Claudia Burbano-García

{JournalName}

Claudia Burbano

Assistant Editor

<http://revistadelaconstruccion.uc.cl>

[← Responder](#) [→ Reenviar](#)

Anexo 2. Resolución de Sustentación



"Año de la Experiencia y el Fortalecimiento de la Democracia"

RESOLUCIÓN N° 614-2026/UPeU-FIA-CF

Lima, Ñaña, 04 de junio de 2026

VISTO:

El expediente de los (las) bachilleres **Jorge Luis Quispe Aleca** identificado(a) con código universitario N° 201522341 y **Roy Armando Nina Infa** identificado(a) con código universitario N° 201812017, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la sustentación de la tesis en formato artículo;

Que el Comité Dictaminador ha emitido su dictamen aprobando el informe de tesis titulado "Estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de escoria de acero y caucho reciclado en cimentaciones de la provincia de Espinar", presentado por los (las) bachilleres **Jorge Luis Quispe Aleca** y **Roy Armando Nina Infa** reuniendo de esta manera las condiciones previas para la declaratoria de expedito para la programación de la sustentación;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 04 de junio de 2026, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Artículo 1. – DECLARAR EXPEDITO a los (las) bachilleres **Jorge Luis Quispe Aleca** y **Roy Armando Nina Infa** para que sustenten la tesis en formato artículo "Estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de escoria de acero y caucho reciclado en cimentaciones de la provincia de Espinar", conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Civil, el 17 de junio, a las 11:15 horas, en la modalidad presencial, en la Sala de Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil.

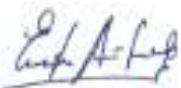
Artículo 2. – DESIGNAR EL JURADO DE SUSTENTACIÓN, encargado de gestionar la sustentación respectiva, el mismo que queda constituido por los siguientes miembros:

Presidente: Mg. Herson Duberty Parí Cusi
Secretario: MSc. Eder Mamani Chambi
Asesor: Mtro. Leonel Chahuane Paucar
Vocal: Dr. Edwin Parillo Escamena

Artículo 3. – DISPONER que la presente Resolución sea registrada, comunicada a las instancias correspondientes y archivada conforme a ley.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA

Por
intermedio
del Sr.
Secretario Académico




Mg. Sc. Gina Marita Tito Tolentino
SECRETARIA ACADÉMICA

Via Unio – Ñaña, altura Km 13 de la Carretera Central, Luján – Chosica, zona 15 – Perú
Teléfono: (01) 6198300 Web: www.upu.edu.pe

 UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS		
TÍTULO DE TESIS	: "Estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de escoria de acero y caucho reciclado en cimentaciones de la provincia de Espinas"	
TESISTAS	: Bach. Jorge Luis Quique Alca y Bach. Roy Armando Niza Infa	
Procedencia de muestra	: Barrio Villa Maza, provincia de Espinar - Cuzco	
Descripción de la muestra	: Suelo natural CP-01	
Fecha de ejec. De ensayo	: 25/11/24	
ENSAJO:		
CONTENIDO DE HUMEDAD		
MTCE-108		
Nro de Muestra	: M-01	
Descripción de la muestra	: CP-01, E-02	
Profundidad de la muestra	: 0.40m	
Método de secado	: Horno T*110±5°C	
DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD		
DATOS	PRUEBA 01	PRUEBA 02
N° de tara	T-013	T-036
Peso de tara (gr)	16.05	16.08
Peso de tara + suelo húmedo (gr)	56.28	99.51
Peso de suelo húmedo (gr)	50.23	83.42
Peso de tara + suelo seco (gr)	43.10	59.50
Peso de suelo seco (gr)	27.05	43.41
Peso del agua (gr)	23.18	40.01
Contenido de humedad parcial (%)	85.69%	92.17%
Contenido de humedad final (%)		

*Las muestras fueron extraídas y puestas en laboratorio por los tesisas, debidamente etiquetadas y acompañadas de sus respectivas descripciones.

**Los ensayos fueron realizados por los tesisas, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido producidos por el laboratorio correspondiente certificación.

*** No se ha calculado el contenido de humedad final por la dispersión que se tiene entre la prueba 01 y 02.



 UNIVERSIDAD PERUNA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS		
TÍTULO DE TESIS	: "Estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de escoria de acero y caucho reciclado en cimentaciones de la provincia de Esmeraldas"	
TESISTAS	: Bach. Jorge Luis Quepe Alca y Bach. Roy Armando Nina Ina	
Procedencia de muestra	: Barrio Villa Neza, provincia de Esmeraldas - Cusco	
Descripción de muestra	: Suelo Natural Inalterado CP-01	
Fecha de ejec. De ensayo	: 15/11/24	
ENSAYO: DENSIDAD DE LA MASA NTP 309.139		
DETALLE: Tipo de Muestra : M-01 Número de calicata : C-01 Número de estrato : E-02 Método : Volumen desplazado		
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MASA		
DATOS	PRUEBA 01	PRUEBA 02
Peso de suelo tallado (gr)	135.36	122.39
Peso de suelo tallado + parafina (gr)	137.02	123.88
Volumen de agua inicial	500.00	500.00
Volumen de agua final	620.00	618.00
Peso de parafina (gr)	1.66	1.49
Volumen de suelo + parafina	120.00	118.00
Peso específico de la parafina (g/cm ³)	0.96	0.96
Volumen de parafina (cm ³)	1.73	1.56
Volumen de suelo tallado húmedo (cm ³)	118.27	116.45
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.14	1.06
Densidad húmeda final (g/cm ³)		

*Las muestras fueron extraídas y puestas en laboratorio por los testigos, debidamente etiquetadas y acompañadas de sus respectivos descripciones.

**Los ensayos fueron realizados por los testigos, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados por el personal correspondiente certificación.

*** No se ha calculado la densidad húmeda final por la dispersión que se tiene entre la prueba 01 y 02.



 UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS	
TÍTULO DE TESIS	"Estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de escoria de acero y caucho reciclado en cimentaciones de la provincia de Espinar"
TESISTAS	Bach. Jorge Luis Quirope Alca y Bach. Roy Armando Nina Infa
Procedencia de muestra	Barrio Villa Meza, provincia de Espinar - Cusco
Descripción de muestra	Suelo natural CP-01
Fecha de ejec. Ensayo	25/11/2024
ENSAJO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO NORMA ASTM - D 432	
Nro de Muestra	M-01
N° calcula / N° ensayo	CP-01 / E-02
Clasificación SUCS	MH
Clasificación AASHTO	A-7.5 (42)
Estado de la Muestra	Alfombra

TAMOS ASTM	ABERTURA (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% que pasa
3"	76.2	0.00	0.00	0.00	100.0
2"	50.8	0.00	0.00	0.00	100.0
1 1/2"	38.1	0.00	0.00	0.00	100.0
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.0
3/4"	19.05	0.00	0.00	0.00	100.0
1/2"	12.7	0.00	0.00	0.00	100.0
3/8"	9.53	0.00	0.00	0.00	100.0
1/4"	6.35	0.00	0.00	0.00	100.0
No4	4.75	4.38	0.41	0.41	99.59
No10	2.00	8.22	0.75	1.17	98.83
No20	0.84	9.25	0.85	2.02	96.0
No40	0.42	43.65	4.04	6.06	93.9
No60	0.25	46.22	4.28	10.33	89.7
No100	0.15	22.67	2.10	12.43	87.6
No200	0.07	8.90	0.82	13.25	86.7
BASE		937.71	86.74	100.00	0.00
TOTAL		1081.00			

DESECCIÓN DE LA MUESTRA	
Peso Inicial :	1081.0 gr.
Peso Lavado :	143.3 gr.
Peso Perdido :	937.7 gr.
LÍMITES DE CONSISTENCIA	
Límite Líquido :	89.66%
Límite Plástico :	53.36%
IP	36.30%
CARACT. GRANULOMÉTRICAS	
D10 =	NP
D30 =	NP
D60 =	NP
CU =	NP
CC =	NP



*Las muestras fueron extraídas y puestas en laboratorio por los tesis, debidamente etiquetadas y acompañadas de sus respectivas descripciones.

**Los ensayos fueron realizados por los tesis, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.



UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

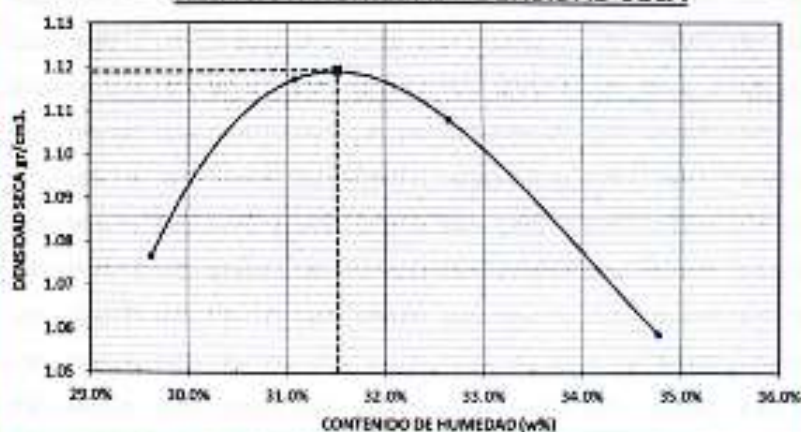
PROYECTO DE TESIS	"Estabilización de suelos arcillosos mediante el uso de escoria de acero y caucho reciclado en cimentaciones de la provincia de Espinar"
TESISTAS	Bach. Jorge Luis Guepo Alca y Bach. Roy Armonio Nina Infa
Procedencia de muestra	Barrio Villa Mota, provincia de Espinar - Cusco
Descripción de muestra	Suelo natural CP-03 + 15% escoria de acero + 15% caucho reciclado
Fecha de ejec. de ensayo	05/12/2024

COMPACTACIÓN DE SUELOS NTP 308.142, MTC E 116	Nro de Muestra	M-01
	Descripción de muestra	Afinada
	Método de Compactación	Método "A"
	Nro de capas	03 capas
	Material utilizado	Pasante al tamiz N°4*
Proctor Estándar		

DESCRIPCIÓN	CONTROL DE DENSIDAD			
Volumen del Molde	m ³	942.48	942.48	942.48
Peso del Molde	gr.	4000.00	4000.00	4000.00
Peso Suelo Humedo + Molde	gr.	5315.50	5380.00	5385.00
Peso del Suelo Humedo	gr.	1315.50	1380.00	1385.00
Densidad del Suelo Humedo	gr/cm ³	1.48	1.48	1.47

DESCRIPCIÓN	CONTROL DE HUMEDAD							
Capsula No	No	T-009	T-004	T-003	T-028	T-035	T-025	T-004
Suelo Humedo + Capsula	gr.	57.55	55.74	48.67	48.55	70.96	69.65	71.62
Peso del Suelo Seco + Capsula	gr.	49.51	46.77	41.13	37.64	59.98	56.42	57.60
Peso del Agua	gr.	8.04	8.97	7.74	10.91	11.98	13.23	14.02
Peso de la Capsula	gr.	20.76	16.90	16.33	22.41	22.02	16.22	16.40
Peso del Suelo Seco	gr.	28.75	30.27	24.80	35.23	36.96	40.20	40.34
% de Humedad	%	27.97%	29.65%	31.21%	30.97%	32.41%	32.91%	34.75%
Promedio de Humedad	%	29.83%		31.09%		32.66%		34.78%
Densidad del Suelo Seco	gr/cm ³	1.077		1.117		1.100		1.059

RELACIÓN HUMEDAD - DENSIDAD SECA



MÁXIMA DENSIDAD SECA	:	1.12	gr/cm ³
ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD	:	31.52%	

*Las muestras fueron extraídas y puestas en laboratorio por los tesisas, debidamente etiquetadas y acompañadas de sus respectivas descripciones.

**Los ensayos fueron realizados por los tesisas, siguiendo los procedimientos establecidos en el laboratorio. Los resultados han sido procesados para su correspondiente certificación.



Anexo 4. Fotografías



