

Soil improvement for a subgrade using metallic “spark” – Cajamarca 2025

Rodríguez Gutiérrez, Marian Rosa Romeli¹; Vásquez Paredes, Danny Jhefersson².

¹Universidad Privada del Norte (UPN) – Cajamarca, Perú N00199159upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN) – Cajamarca, Perú N00277283@upn.pe

Abstract - This study seeks to address the need for innovation in the improvement of subgrades, highlighting the importance of the bearing capacity of the soil in the construction of infrastructure. This is why a detailed investigation is presented on the use of metallic spark as an innovative material to improve soil properties. The results obtained demonstrate a significant improvement in the CBR index (California Bearing Ratio), confirming the viability and effectiveness of this method. The conclusions highlight the potential of metallic spark to strengthen foundations, providing a solid foundation to develop more resilient infrastructure. The recommendations suggest expanding the research to various contexts and optimizing the application of the metallic spark. This study contributes to the advancement of geotechnical engineering, offering new perspectives for sustainable soil improvement in construction projects.

Keywords: metal spark, Proctor, CBR, soil improvement, subgrade, construction.

Mejoramiento de suelos para subrasante mediante “chispa” metálica – Cajamarca 2025

Rodríguez Gutiérrez, Marian Rosa Romeli¹; Vásquez Paredes, Danny Jheferson².

¹Universidad Privada del Norte (UPN) – Cajamarca, Perú N00199159upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN) – Cajamarca, Perú N00277283@upn.pe

Resumen - Este estudio busca abordar la necesidad de innovación en la mejora de subrasantes, remarcando la importancia de la capacidad portante del suelo en la construcción de infraestructuras. Es por esto que se presenta una investigación detallada sobre el uso de chispa metálica como material innovador para mejorar las propiedades del suelo. Los resultados obtenidos demuestran una mejora significativa en el índice CBR (California Bearing Ratio), confirmando la viabilidad y eficacia de este método. Las conclusiones destacan el potencial de la chispa metálica para fortalecer cimientos, proporcionando una base sólida para desarrollar infraestructuras más resilientes. Las recomendaciones sugieren ampliar la investigación a diversos contextos y optimizar la aplicación de la chispa metálica. Este estudio contribuye al avance de la ingeniería geotécnica, ofreciendo nuevas perspectivas para la mejora sostenible del suelo en proyectos de construcción.

Palabras claves: chispa metálica, Proctor, CBR, mejoramiento de suelos, subrasante, construcción.

I. INTRODUCCIÓN

La mejora de la subrasante es un aspecto crucial en la construcción de infraestructuras, debido a que impacta directamente en la estabilidad y durabilidad de estas [1]. A pesar de los métodos tradicionales empleados para este propósito, se han identificado limitaciones que resaltan la necesidad de buscar alternativas innovadoras para lograr una mejora efectiva del suelo. La capacidad portante del suelo desempeña un papel determinante en la estabilidad y durabilidad de las estructuras [2], lo que plantea el desafío de encontrar técnicas novedosas y sostenibles para fortalecer dicha capacidad.

El ámbito de mejora del suelo está en constante evolución, con la búsqueda continua de nuevas técnicas que ofrezcan mejores resultados [3]. En los últimos años, se ha logrado un progreso significativo en este campo, incorporando nuevas teorías, materiales y métodos de construcción [3]. No obstante, persisten desafíos en la búsqueda de técnicas innovadoras y sostenibles para la mejora del suelo.

Existen diversas técnicas para el mejoramiento del suelo, como el uso de geotextiles [4], fibras de vidrio [5] y la estabilización con arena y cemento [6]. Estas técnicas han demostrado ser efectivas en incrementar la capacidad portante del suelo, evidenciado en pruebas como la relación de soporte de California (CBR) y las pruebas de Proctor [4, 5, 6]. Sin embargo, no se han realizado investigaciones previas sobre el uso de "chispa metálica" para la mejora del suelo.

El propósito de esta investigación es explorar la innovación en la mejora del suelo para subrasantes mediante el uso de chispa

metálica, llenando así un vacío en la literatura existente e introduciendo un nuevo material para el mejoramiento de suelos.

La hipótesis de investigación postula que el uso de chispa metálica puede resultar en una mejora significativa de la capacidad portante del suelo. Las preguntas clave de investigación incluyen: ¿Cómo afecta la chispa metálica a las propiedades del suelo? ¿Cuál es el mecanismo detrás de este efecto?

En términos clave para este estudio: a) el mejoramiento de suelos es el proceso de optimizar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo para garantizar la estabilidad y durabilidad de las carreteras, incluyendo la estabilización y/o consolidación del terreno, así como la utilización de materiales aditivos para mejorar las propiedades del suelo [7]; b) la subrasante es la capa de tierra subyacente que sostiene la estructura de la carretera, incluyendo la capa de suelo compactado y los materiales utilizados en la construcción de la carretera, como hormigón o asfalto [7]; c) la chispa metálica es un material obtenido de los cortes de perfil metálico y limaduras de un taller de mecánica de producción; y d) las pruebas de CBR y Proctor son pruebas comunes utilizadas para evaluar la calidad y propiedades mecánicas del suelo, como la capacidad portante y la resistencia a la compresión.

La investigación se llevará a cabo en el laboratorio de suelos de la Universidad Privada del Norte, sede Cajamarca, utilizando un suelo arcilloso de baja plasticidad. Se buscará mejorar sus propiedades mediante la incorporación de chispas metálicas, mezclando una cantidad específica de este material y realizando pruebas de Proctor y CBR. Los resultados de la investigación se analizarán utilizando métodos estadísticos.

Se espera que los resultados demuestren que la tecnología de chispa metálica puede mejorar significativamente las propiedades del suelo para subrasantes. En particular, se anticipa un aumento en la capacidad de soporte de carga del suelo, la resistencia a la compresión y la resistencia a la erosión. Estos hallazgos podrían propiciar el desarrollo de nuevas prácticas de mejora de suelos para subrasantes que sean más eficaces y económicas.

II. MATERIALES Y MÉTODO

Para llevar a cabo esta investigación, se realizó la clasificación de suelos por el método de SUCS, ensayo de Proctor Modificado y CBR.

Los materiales utilizados en la investigación incluyen suelo arcilloso de baja plasticidad, chispa metálica (*tubería, ángulos, platinas útiles para estructuras metálicas*) y agua. El suelo

arcilloso de baja plasticidad se obtuvo de una cantera local de Cajamarca y se utilizó como suelo de prueba en este estudio. Se realizaron pruebas de clasificación de suelos para determinar sus propiedades físicas y mecánicas. La chispa metálica, que se obtuvo de los cortes de perfil metálico y limaduras de un taller de mecánica de producción, se utilizó como material de refuerzo en el suelo de prueba. El agua se utilizó para ajustar la humedad del suelo durante las pruebas de compactación.



Fig. 01 Chispa metálica

Los equipos empleados incluyeron una balanza digital de precisión ± 0.01 gr (marca OHAUS, modelo Scout), tamices normalizados incluyendo la malla N°4 (apertura de 4.75 mm), martillo de goma de 2.5 kg para reducción de tamaño de partículas, molde cilíndrico de 944 cm³ para ensayos de Proctor, martillo estándar Proctor de 2.5 kg de peso y caída libre de 30 cm, y una máquina de ensayo CBR eléctrica equipada con sistema de control de carga y adquisición de datos mediante el software CBRTes[®] 2.0.

La preparación del suelo consistió en su secado al aire libre hasta alcanzar peso constante. Posteriormente, se chancó manualmente con martillo de goma y se tamizó utilizando la malla N°4 para eliminar partículas de mayor tamaño. El material que pasó el tamiz fue utilizado para la preparación de las mezclas. Se mezcló el suelo tamizado con un 5% de chispa metálica respecto al peso seco, logrando una distribución homogénea antes de ajustar la humedad con cantidades controladas de agua.



Fig. 02 Tamizado de suelo por la malla N°4

▼ PROCTOR MODIFICADO

El ensayo de compactación Proctor modificado se llevó a cabo conforme a la norma **ASTM D1557**. Los instrumentos y materiales utilizados para este ensayo fueron:

- * Muestra seca.
- * Papel filtro
- * Equipo Proctor modificado (Molde cilíndrico, placa de base y anillo de extensión).
- * Pisón Proctor modificado.

- * Balanza con aproximación de 0.01 gr.
- * Probeta de 1000 ml.
- * Recipiente de 6 kg de capacidad.
- * Enrazado, cucharón y bandeja.
- * Recipientes identificados (*taras*).

Paso 1. Con la muestra seca, identificamos el método a utilizar (*Método A, B o C*)

ID	DESCRIPCIÓN	UNO	PROCTOR MODIFICADO			ID	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALORES		
			A	B	C				1	2	3
1	MÉTODO					6	DIÁMETRO DEL MOLDE	cm	10.16 ± 0.04	10.16 ± 0.04	15.24 ± 0.07
2	CONDICIONES PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO	N°4 ± 20%	% Ret. Acum. 30" > 20%	% Ret. Acum. 30" > 30%		7	ALTURA DEL MOLDE	cm	11.64 ± 0.05	11.64 ± 0.05	11.64 ± 0.05
			% Ret. Acum. N°4 > 20%	% Ret. Acum. N°4 > 20%	% Ret. Acum. 30"	8	VOLUMEN DEL MOLDE	cm ³	944 ± 0.15	944 ± 0.15	2124 ± 0.25
3	Tipo de material utilizado	Pasante malla N°4	Pasante malla 30"	Pasante malla 30"	Pasante malla 30"	9	PESO DEL MARTILLO	kg	4.54 ± 0.01	4.54 ± 0.01	4.54 ± 0.01
						10	ALTURA CAIDA DEL MARTILLO	cm	45.72 ± 0.16	45.72 ± 0.16	45.7 ± 0.16
4	N° DE CAPAS	5	5	5	5	11	DIÁMETRO DEL MARTILLO	cm	5.08 ± 0.025	5.08 ± 0.025	5.08 ± 0.025
5	N° DE GOLPES	25	25	25	56	12	ENERGÍA DE	Kj/cm ²	27.485	27.485	27.485

Fig. 03 Guía de laboratorio Proctor Modificado

Paso 2. Preparamos 3 muestras con una determinada cantidad de agua (*Cuadro I*), de tal manera que el contenido de humedad de cada una de ellas varíe aproximadamente en ¼% entre ellas.

Paso 3. Ensamblamos los moldes cilíndricos con la placa base y el collar de extensión y papel filtro.

Paso 4. Se procede a compactar cada muestra en 5 capas y cada capa con 25 o 56 golpes (*depende del método A, B o C*) al terminar de compactar la última capa, retiramos el collar de extensión, se enrasa con el enrasador y se determina la densidad húmeda (*Dh*).



Fig. 04 Compactando y enrasando las muestras

Paso 5. Determinamos el contenido de humedad de cada muestra compactada (*W%*), utilizando muestras representativas de la parte superior e inferior del molde.



Fig. 05 Recipiente con muestras representativas

Paso 6. Determinamos las densidades secas (*Ds*) de cada muestra compactada, con ayuda de la siguiente fórmula:

$$D_s = \frac{D_h}{\left(1 + \frac{W\%}{100}\right)} \quad (1)$$

Paso 7. Dibujamos la curva de compactación en escala natural, los datos del contenido de humedad se registran en el eje de las abscisas y los datos de la densidad seca en el eje de las ordenadas (Fig.06).

▼ CBR

Para evaluar la capacidad portante, se ejecutó el ensayo CBR siguiendo la norma **ASTM D1883**. Los materiales utilizados para este ensayo fueron los siguientes:

- * Muestra seca.
- * Papel filtro.
- * Equipo CBR (moldes cilíndricos con placa de base y collar de extensión, 3 placas de extensión, 3 sobrecargas cada una con 4.5 kg de peso y 3 trípodes).
- * Pisón Proctor modificado.
- * Balanza con precisión de 1 gr.
- * 3 diales de expansión con divisiones de 0.01 mm.
- * Probeta de 1000 ml.
- * Recipiente de 6 kg de capacidad.
- * Espátula.
- * Taras identificadas.

ENSAYO DE COMPACTACIÓN CBR

Paso 1. Preparar la muestra con el contenido óptimo de humedad determinado en el ensayo de Proctor modificado.

Paso 2. Ensamblar los moldes cilíndricos con sus placas de base, collares de extensión, discos espaciadores y papel filtro.

Paso 3. Compactar la muestra con los 3 moldes CBR en cada uno de ellos en 5 capas, el primer molde se compactó con 13 golpes, el segundo molde se compactó con 27 golpes y el tercer molde se compactó con 56 golpes por capa.

Paso 4. Determinamos la densidad húmeda y el contenido de humedad de las muestras de cada molde.

Paso 5. Determinamos la densidad seca de las muestras de cada molde.

ENSAYO CARGA – PENETRACIÓN

Paso 1. Después de 4 días sacar los moldes del tanque y dejarlos drenar por 15 minutos.

Paso 2. Colocar la sobrecarga a cada molde y llevar a la prensa hidráulica, para proceder con el ensayo de penetración aplicando un pisón a una velocidad de 0.05 pulg/min, registrando las lecturas de carga y penetración de cada muestra.

Paso 3. Determinar nuevamente la densidad húmeda y el contenido de humedad de cada muestra.

Paso 4. Dibujar las 3 curvas ESFUERZO – DEFORMACIÓN de cada molde en escala natural, los valores de la penetración se registrarán en el eje de las abscisas y los valores de los esfuerzos en el eje de las ordenadas. *NOTA: algunas veces es necesario corregir la curva, cambiando el origen de las coordenadas.*

Paso 5. Determinamos los esfuerzos correspondientes a 0.1” y 0.2” de penetración de cada una de las curvas de ESFUERZO – DEFORMACIÓN.

Paso 6. Determinar los índices de CBR para 0.1” y 0.2” de penetración, los cuales se obtiene dividiendo cada valor de esfuerzo correspondiente a 0.1” y 0.2” de la muestra ensayada entre el esfuerzo patrón correspondiente a 0.1” y 0.2”.

Paso 7. Dibujar las 2 curvas de densidad seca versus CBR correspondiente a 0.1” y 0.2” de penetración.

Paso 8. El índice CBR de diseño será el menor valor obtenido correspondiente al 95% de densidad seca máxima. Posteriormente, los datos fueron analizados mediante cálculo de promedios, desviaciones estándar y análisis comparativo entre el suelo natural y el suelo mejorado con chispa metálica.

El procedimiento experimental fue documentado fotográficamente, incluyendo imágenes de la preparación del material, los equipos utilizados y los moldes empleados. La investigación cumplió estrictamente con las normas **ASTM D1557** para el ensayo Proctor modificado y **ASTM D1883** para el ensayo CBR.

III. RESULTADOS

Los ensayos realizados con el objetivo de evaluar las propiedades mecánicas del suelo natural mostraron los siguientes resultados:

CUADRO I
Valores Proctor modificado terreno natural

ID	Descripción	UND	1		2		3		4	
			a	b	a	b	a	b	a	b
A	Peso Molde	gr	3913.00		4171.00		4173.00		4173.00	
B	Peso Muestra Húmeda + Molde	gr	5500.00		5880.00		6140.00		5700.00	
C	Peso Muestra Húmeda	gr	1587.00		1709.00		1967.00		1527.00	
D	Volumen Muestra húmeda	cm3	933.06		933.06		933.06		933.06	
E	Densidad húmeda; Dh	gr/cm3	1.70		1.83		2.11		1.64	
F	Recipiente	N°								
G	Peso Recipiente	gr	28.25	34.87	28.79	27.28	28.25	29.41	27.68	31.71
H	Peso Muestra húmeda + Recipiente	gr	89.72	75.74	57.35	69.71	63.39	68.31	81.23	95.74
I	Peso Muestra Seca + Recipiente	gr	84.32	72.13	54.47	65.23	59.12	63.80	73.98	86.97
J	Peso del Agua	gr	5.40	3.61	2.88	4.48	4.27	4.51	7.25	8.77
K	Peso Muestra seca	gr	56.07	37.26	25.68	37.95	30.87	34.39	46.30	55.26
L	Contenido de Humedad W%	%	9.63	9.69	11.21	11.81	13.83	13.11	15.66	15.87
M	Promedio Contenido de humedad Óptimo	%		9.66		11.51		13.47		15.76
N	Densidad Seca Máxima; Ds	gr/cm3	1.55	1.55	1.65	1.64	1.85	1.86	1.41	1.41
O	Promedio Densidad Seca Máxima; Ds	%		1.55		1.64		1.86		1.41

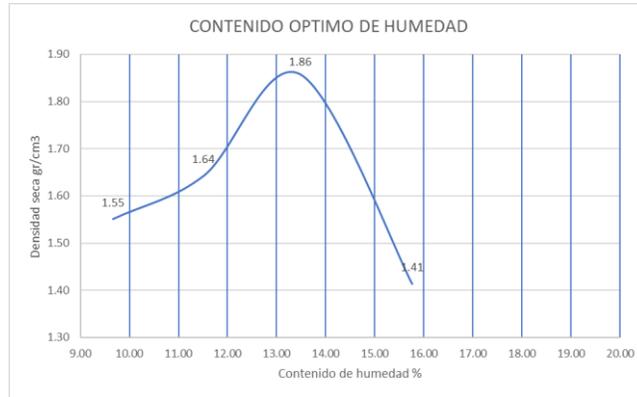


Fig. 06. Contenido óptimo de humedad suelo natural.

El CUADRO I muestra los resultados de un ensayo de Proctor modificado. El ensayo se realizó para determinar la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo de un material granular. Del ensayo de Proctor del terreno natural tenemos que su contenido óptimo de humedad es 13.47% y su densidad óptima es de 1.86, como se muestran en la figura. 06; estos valores los utilizaremos para realizar el ensayo de CBR.

ESFUERZO - DEFORMACIÓN

CUADRO II

ESFUERZOS PARA 0.1" Y 0.2" DE PENETRACIÓN

MOLDE N°	MOLDE 1		MOLDE 2		MOLDE 3	
PENETRACIÓN (")	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
Esfuerzo terreno (lb/pul ²)	130.117	224.09	151.803	253.00	169.874	281.92
Esfuerzo patrón (lb/pulg ²)	1000	1500.00	1000	1500.00	1000	1500.00
CBR (%)	13.01	14.94	15.18	16.87	16.99	18.79

Elaboración propia

CUADRO III

C.B.R Y DENSIDAD SECA

MOLDE N°	MOLDE 1		MOLDE 2		MOLDE 3	
PENETRACIÓN (")	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
CBR (%)	13.01	14.94	15.18	16.87	16.99	18.79
Ds (gr/cm ³)	1.56	1.56	1.72	1.72	1.86	1.86

Elaboración propia

CURVAS CBR - DENSIDAD SECA

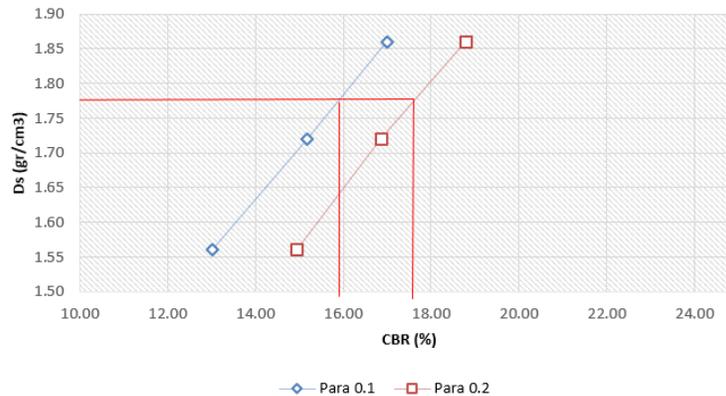


Fig. 07 CBR terreno natural

En la Fig. 07 se observa que el CBR para 0.1” es de 15.8% y para 0.2” 17.2%, tomando así este último como dato para el terreno natural.

Para cumplir con el objetivo de este estudio repetimos el procedimiento anterior pero esta vez se analiza el suelo mezclado con las chispas de metal.

CUADRO IV
Valores Proctor modificado terreno natural mejorado

Descripción	UND	1		2		3		4	
Peso Molde	gr	5080		5020		5120		5020	
Peso Muestra Húmeda + Molde	gr	5860		5880		5980		5840	
Peso Muestra Húmeda	gr	1642		1798		1993		1712	
Volumen Muestra húmeda	cm ³	933.06		933.06		933.06		933.06	
Densidad húmeda; Dh	gr/cm ³	1.76		1.93		2.14		1.83	
Recipiente	Nº	a	b	a	b	a	b	a	b
Peso Recipiente	gr	28.00	31.71	27.70	28.00	27.60	27.28	27.70	29.41
Peso Muestra húmeda + Recipiente	gr	140.00	138.60	141.90	145.32	143.70	135.72	142.50	146.32
Peso Muestra Seca + Recipiente	gr	128.54	129.45	130.24	133.65	130.55	123.87	128.35	131.58
Peso del Agua	gr	11.46	9.15	11.66	11.67	13.15	11.85	14.15	14.74
Peso Muestra seca	gr	100.54	97.74	102.54	105.65	102.95	96.59	100.65	102.17
Contenido de Humedad W%	%	11.40	9.36	11.37	11.05	12.77	12.27	14.06	14.43
Promedio Contenido de humedad Óptimo	%	10.38		11.21		12.52		14.24	
Densidad Seca Máxima; Ds	gr/cm ³	1.58	1.61	1.73	1.74	1.89	1.90	1.61	1.60
Promedio Densidad Seca Máxima; Ds	%	1.59		1.73		1.90		1.61	

Elaboración propia.

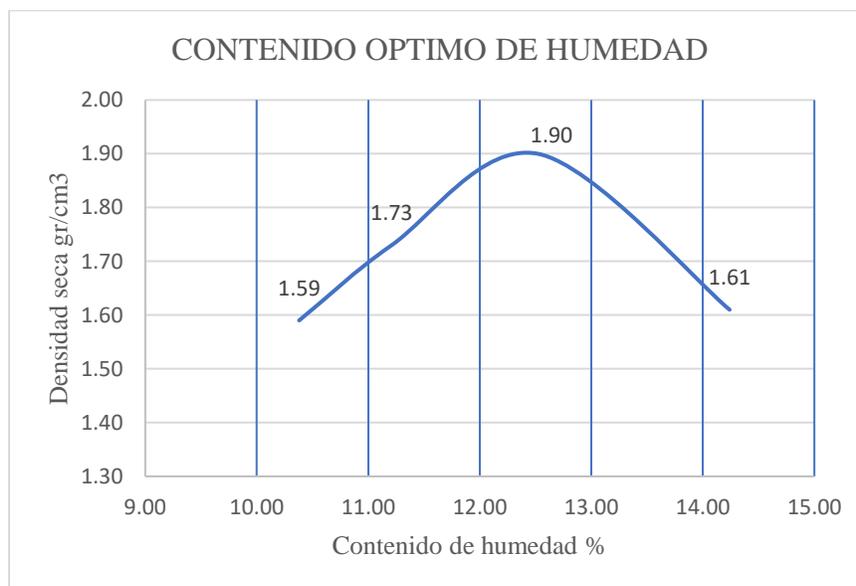


Fig. 08 Contenido óptimo de humedad

En la Fig. 08 visualizamos que el contenido óptimo de humedad del material mejorado es de 12.4% y su densidad seca máxima de 1.90. Estos valores nos son útiles para realizar el ensayo de CBR.

**CUADRO V
ESFUERZOS PARA 0.1" Y 0.2" DE PENETRACIÓN**

MOLDE N°	MOLDE 1		MOLDE 2		MOLDE 3	
PENETRACIÓN (")	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
Esfuerzo terreno (lb/pul ²)	140.960	245.78	166.260	271.08	191.561	296.38
Esfuerzo patrón (lb/pul ²)	1000	1500	1000	1500	1000	1500
CBR (%)	14.10	16.39	16.63	18.07	19.16	19.76

**CUADRO VI
C.B.R Y DENSIDAD SECA**

MOLDE N°	MOLDE 1		MOLDE 2		MOLDE 3	
PENETRACIÓN (")	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
CBR (%)	14.10	16.39	16.63	18.07	19.32	20.54
Ds (gr/cm ³)	1.59	1.59	1.73	1.73	1.90	1.90

CURVAS CBR - DENSIDAD SECA

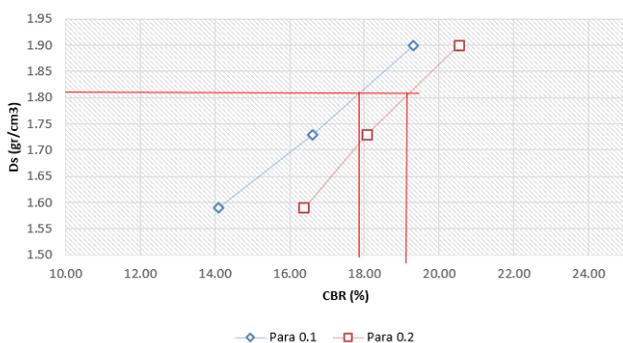


Fig. 09 CBR terreno mejorado

En la Fig. 09 se aprecia que el CBR para 0.1" es de 17.8% y para 0.2" 19.2%.

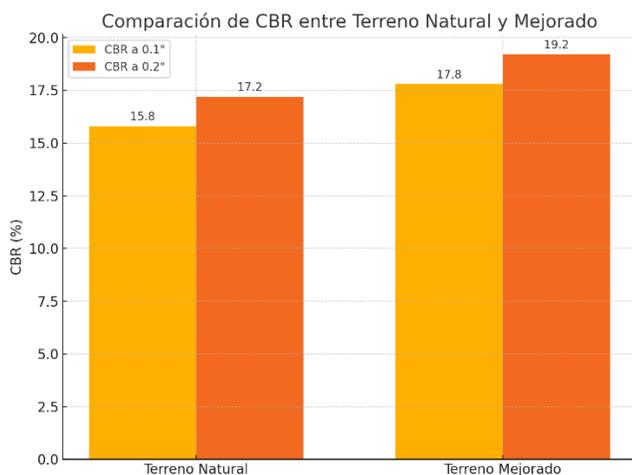


Fig. 10 Comparación de CBR

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de chispa metálica (*tuberías, ángulos y platinas usadas en estructuras metálicas*) produjo una mejora significativa en la capacidad portante del suelo. Esta mejora se evidencia claramente al comparar los valores del Índice CBR del suelo natural (17.2%) con los del suelo mejorado (19.2%), lo que representa un incremento del 2.0 puntos porcentuales, equivalente a una mejora relativa de aproximadamente 11.6%.

El aumento en la capacidad portante puede atribuirse a la función de refuerzo que ejercen las partículas metálicas dentro de la matriz del suelo. Estas partículas actúan como inclusiones que restringen la deformación del material y mejoran la resistencia al corte interno, generando un comportamiento mecánico más robusto. Este fenómeno coincide con hallazgos reportados en estudios previos sobre el uso de materiales fibrosos o particulados como refuerzos en suelos, donde se observan mejoras similares en propiedades mecánicas clave.

Además del valor técnico, la evidencia experimental obtenida tiene importantes implicaciones prácticas. El uso de chispa metálica como aditivo para el mejoramiento del suelo representa una alternativa económicamente viable y ambientalmente sostenible. Al reutilizar residuos industriales que de otro modo constituirían pasivos ambientales, se promueve una economía circular y se reducen los impactos negativos asociados a la disposición de desechos.

Por último, los resultados sugieren que esta técnica de mejoramiento tiene un alto potencial de aplicación en proyectos de infraestructura vial, plataformas industriales y otras obras civiles que exigen subrasantes de alto rendimiento. De esta manera, se contribuye al desarrollo de entornos urbanos más seguros, eficientes y resilientes.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de este estudio confirman de manera sólida la hipótesis planteada: la incorporación de chispa metálica al suelo genera un efecto positivo y significativo en su capacidad portante. La comparación de los valores del índice CBR, que aumentó de 17.2% en el suelo natural a 19.2% en el suelo tratado, evidencia una mejora mecánica relevante. Este incremento respalda el potencial de la chispa metálica como un material viable para el mejoramiento de suelos utilizados en subrasantes.

Este hallazgo tiene importantes implicaciones en el ámbito de la ingeniería geotécnica y la construcción de infraestructuras, donde la estabilidad y durabilidad del terreno base son determinantes para el desempeño de las obras. La capacidad de reforzar suelos mediante residuos metálicos reciclados ofrece además una alternativa técnica con beneficios ambientales y económicos, al promover la reutilización de desechos industriales.

Se recomienda realizar estudios adicionales que evalúen el efecto de la chispa metálica en distintos tipos de suelos (*arcillosos, arenosos, limosos*), considerando variaciones en sus propiedades geotécnicas y condiciones de humedad. Es necesario investigar diferentes proporciones de chispa metálica en relación con el volumen de suelo, con el objetivo de determinar la dosificación óptima que maximice la capacidad portante sin comprometer la trabajabilidad ni otras propiedades fundamentales del suelo.

Así mismo, Se sugiere llevar a cabo ensayos de durabilidad a largo plazo, que incluyan la exposición a ciclos de humedad-sequía, variaciones térmicas y cargas repetidas, para valorar la estabilidad del refuerzo en condiciones reales de servicio.

Finalmente, se recomienda realizar un análisis costo-beneficio y una evaluación de impacto ambiental para valorar la viabilidad integral de implementar esta técnica en proyectos de ingeniería a mayor escala.

REFERENCIAS

[1] D. M. A. B. Chávez Arbayza and G. Odar Yabar, “Propuesta de estabilización con cal para subrasantes con presencia de suelos arcillosos en bofedales y su influencia en el pavimento rígido bajo la metodología de diseño AASHTO 93 aplicado al tramo 1 de la carretera Oyón-Ambo,” Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, Perú, 2019.

[2] Vladimir Amorin (s.f.) Análisis de la capacidad portante de suelos no cohesivos en climas tropicales para cimentaciones superficiales. Recuperado de: <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG17-160.pdf>

[3] Jie Huanh & Prabir K Kolay (2024) Recent Advances in Soil Improvement. Recuperado de: <https://www.frontiersin.org/research-topics/61541/recent-advances-in-soil-improvement#overview>

[4] S. Ramjiram Thakur, B.P. Naveen & J.P. Tegar (2021). Improvement in CBR value of soil reinforced with nonwoven geotextile sheets. International Journal of Geo-Engineering. 12(8). <https://doi.org/10.1186/s40703-020-00138-9>

[5] Patel, S.K., Singh, B. Experimental Investigation on the Behaviour of Glass Fibre-Reinforced Cohesive Soil for Application as Pavement Subgrade Material. Int. J. of Geosynth. and Ground Eng. 3, 13 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40891-017-0090-x>

[6] Mrs. Netetu B.; Anilkumar Saxema & T. R. Arora (2014). Stabilization of Black Cotton Soil With Sand and Cement as a Subgrade for Pavement. Ramteke, 3(6) 688-692. https://www.academia.edu/7540771/Stabilization_of_Black_Cotton_Soil_With_Sand_and_Cement_as_a_Subgrade_for_Pavement

[7] Cardenas Nathaly (2019). ¿Cuál es la importancia de realizar un “estudio de suelo” para construir?. UTPLblog. Recuperado de: <https://noticias.utpl.edu.ec/cual-es-la-importancia-de-realizar-un-estudio-de-suelo-para-construir>

[8] Geotecnia Facil (2018). El ensayo CBR de laboratorio: ¿Qué es? y ¿cuál es su procedimiento?. GEOTECNIA FACIL. Recuperado de: <https://geotecniafacil.com/ensayo-cbr-laboratorio/>

[9] Proctor compaction test - Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Proctor_compaction_test.

[10] What is the ASTM designation for the standard Proctor test. <https://angolatransparency.blog/en/what-is-the-astm-designation-for-the-standard-proctor-test/>.

[11] Standard Proctor Test – Procedure – Apparatus – Calculation. <https://definecivil.com/standard-proctor-test/>.

[12] D1883 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of <https://www.astm.org/standards/d1883>.

[13] ASTM International - ASTM D1883-21 - Standard Test Method for

<https://standards.globalspec.com/std/14510610/ASTM%20D1883-21>.

[14] ASTM D4429-04 - Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmd442904>.

[15] ASTM D1883-07 - Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmd188307>.

[16] ASTM D1883-16 - Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmd188316>.