UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL

Evaluación de propiedades mecánicas de arenas mezcladas con bentonita sódica para aplicaciones viales

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

AUTOR

Luis Angel Chiroque Negron

ASESOR

Carlos Rafael Tafur Jimenez

https://orcid.org/0000-0003-0119-8234

Chiclayo, 2023

MECHANICAL PROPERTIES EVALUATION OF SANDS MIXED WITH SODIUM BENTONITE FOR ROAD APPLICATIONS

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%	16%	9%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.revistacienciapolitica.cl Fuente de Internet	4%
2	www.researchgate.net Fuente de Internet	1%
3	www.ijraset.com Fuente de Internet	1%
4	hal.archives-ouvertes.fr Fuente de Internet	1%
5	www.mdpi.com Fuente de Internet	1%
6	Priscilla Paniagua, Stefan Ritter, Mari Moseid, Gudny Okkenhaug. "Bioashes and Steel Slag as Alternative Binders in Ground Improvement of Quick Clays", Geo-Congress 2023, 2023 Publicación	1%
7	www.scielo.cl Fuente de Internet	1%

Índice

Resumen **4**

Abstract **5**

Introducción **6**

Materiales y métodos **8**

- **Materiales** **8**
- **Métodos** **9**

Resultados y Discusión **10**

- **Propiedades Físicas** **10**
- **Propiedades Mecánicas** **12**

Conclusiones **16**

Referencias **17**

Resumen

Una de las principales características de los suelos arenosos es su baja capacidad resistente y su falta de cohesión entre los granos, debido a su bajo contenido en partículas finas, lo que los convierte en un material con limitaciones para el campo de la construcción. Por ello, el objetivo principal de esta investigación es evaluar la influencia de la bentonita sódica en la mejora de las propiedades mecánicas de las arenas para que pueda ser utilizada como estabilizante de subrasantes en proyectos de carreteras. Como parte del desarrollo del objetivo, se evaluarán sus propiedades mecánicas, las cuales se determinarán mediante ensayos de compactación, CBR y expansividad. Las muestras experimentales fueron con adiciones de 4%, 8%, 12% y 16% de bentonita. Asimismo, se realizó la caracterización del material natural a través de ensayos físicos como Granulometría, Limites y Clasificación. Los resultados que se trataba de una arena pobremente graduada (SP) o suelo tipo A-3. Por otro lado, mostraron un aumento de su densidad seca máxima de 1,642 g/cm3 a 1,999 g/cm3 y del valor CBR, de 9,76% a 19,06%, los cuales se obtuvieron para una adición del 12%. De la misma manera, se presentó un aumento en la expansión de 0mm a 2.5mm con la adición del 16%.

Palabras clave: Bentonite, CBR, Subrasante, Suelos Arenosos

Abstract

One of the main characteristics of sandy soils is their low bearing capacity and lack of cohesion between grains, due to their low fine particle content, which makes them a material with limitations for the construction field. Therefore, the main objective of this research is to evaluate the influence of sodium bentonite in improving the mechanical properties of sands so that it can be used as a subgrade stabilizer in road projects. As part of the development of the objective, its mechanical properties will be evaluated, which will be determined by compaction, CBR and expansivity tests. The experimental samples were with additions of 4%, 8%, 12% and 16% bentonite. Likewise, the characterization of the natural material was carried out through physical tests such as Granulometry, Limits and Classification. The results showed that it was a poorly graded sand (SP) or soil type A-3. On the other hand, they showed an increase in its maximum dry density from 1.642 g/cm3 to 1.999 g/cm3 and in the CBR value, from 9.76% to 19.06%, which were obtained for an addition of 12%. Likewise, there was an increase in expansion from 0 mm to 2.5 mm with the addition of 16%.

Keywords: Bentonite, CBR, Subgrade, Sandy Soils

Introducción

Los suelos arenosos se han considerado durante mucho tiempo con limitaciones para proyectos de construcción como edificios y carreteras. Presentan propiedades mecánicas como baja capacidad portante, baja integración de partículas y alta porosidad que no permiten su uso (Elsawy, 2021). Por ello, los ingenieros proyectistas no utilizan estos materiales y deciden cambiarlos total o parcialmente por materiales que cumplan las especificaciones técnicas a las que se destina la obra. Esta tecnología, denominada estabilización de suelos, se ha aplicado en presencia de suelos débiles y no cohesivos, mezclándolos con materiales como cemento, cal, cloruro de sodio, escoria de hornos de fundición, entre otros, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas (Islam, Hoque, Uddin, & Chowdhury, 2018).

Algunos estudios analizaron el efecto de materiales ecológicos como el polvo de horno de cemento o las fibras naturales de palma. Cuando se mezclaron con arenas, en proporciones del 0,5%, 1% y 1,5%, mejoraron la resistencia al cizallamiento y la capacidad portante del suelo, así como el ángulo de fricción y la cohesión de las partículas (Jawad Alhassani, 2021). Sin embargo, conocer el tipo de suelo a trabajar es esencial en la selección del material estabilizante, ya que permite conocer sus propiedades, las cuales serán modificadas por la interacción entre las partículas estabilizantes y el suelo natural. Una característica principal de las arenas es la ausencia de partículas cohesivas finas, como arcillas y limos, lo que provoca que el suelo no pueda adherirse entre sus partículas (Bani Baker, Abendeh, Sharo, & Hanna, 2022). En consecuencia, la no cohesividad hace que los granos no formen estructuras complejas que den resistencia al suelo, lo cual es un requisito para una subrasante óptima.

Por esta razón, el estabilizador óptimo debería estar compuesto por arcillas y limos, y un ejemplo cercano es la bentonita. Durante mucho tiempo, la bentonita se ha utilizado en la industria minera y petrolera, gracias a su propiedad de absorber grandes cantidades de agua y su alto potencial de hinchamiento (Ojuri & Opeyemi, 2017). La bentonita es un silicato de aluminio hidratado compuesto de motmontillonita, un mineral arcilloso con excelentes aptitudes geológicas, y a su vez se dividen en dos tipos de bentonita: sódica y cálcica. Su diferencia radica en su alto potencial de hinchamiento, siendo más beneficioso para la bentonita con su ion sodio predominante. Recientes investigaciones realizadas con bentonita sódica afirman que, mezclada con arenas desarenadas en Italia, con un contenido superior al 5%, fue capaz de mejorar el índice de plasticidad del suelo, haciéndolo más compresible y resistente (Proia, Croce, & Modoni, 2016).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar el efecto de la bentonita de sodio en las propiedades mecánicas de arenas para ser utilizadas como estabilizador de subrasantes en proyectos viales. Debido a su propiedad altamente expansiva, la bentonita de sodio no sólo influirá en el potencial de hinchamiento de la mezcla, sino también en su capacidad portante y resistencia, lo cual es indispensable para las características de una subrasante. Del mismo modo, los suelos arenosos son abundantes en zonas costeras o áridas (Islam, Hoque, Uddin, & Chowdhury, 2018). Para este estudio se utilizaron contenidos de 4%, 8%, 12% y 16% de bentonita sódica y se realizó la comparación con la muestra natural, a través de ensayos mecánicos como el ensayo de compactación y el CBR. Este articulo muestra los resultados de los ensayos ejecutados a través de gráficos y aplicando las especificaciones de diseño de una sección típica de pavimento

Materiales y métodos

Materiales

La bentonita sódica es una arcilla altamente expansiva con gran capacidad de hinchamiento. Es un producto industrializado, envasado en sacos de 30 kg. Las propiedades del material mencionadas en la especificación técnica se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades específicas de las arenas y bentonita

Propiedades	Arena	Bentonita
Gravedad Específica	2.65	2.5
Limite Liquido (%)	NP	180
Limite Plástico (%)	NP	56
Índice Plasticidad (%)	-	124
Máxima Densidad Seca (kg/m3)	1.60	1.40
Optimo Contenido de Humedad (%)	12	10
Contenido de Montmorillonita (%)	-	60

La arena se extrajo de las dunas de Morrope, situadas en el departamento de Lambayeque (Perú). Estas arenas están compuestas especialmente de dióxido de silicio y se ensayaron por separado. Las propiedades de este material se muestran en la Tabla 1. Asimismo, las imágenes de los puntos de extracción se muestran en la Figura 1.

(a) **(b)**

Figura 1. (a) Arenas de Duna; (b) Puntos de extracción

Métodos

Los ensayos de propiedades físicas se realizaron en primer lugar para conocer el material a ensayar, así como su granulometría, su clasificación AASHTO y sus límites de plasticidad. Asimismo, la granulometría de las arenas se realizó sólo para la muestra natural y no con la adición de bentonita. Esta información era necesaria para clasificar el suelo según la metodología de la AASHTO. Por otro lado, para la prueba de límites de plasticidad, la muestra experimental fue incluida con porcentajes de 4%, 8%, 12% y 16% de bentonita. Esto se hizo con el fin de comparar el índice de plasticidad de las muestras natural y experimental, ya que por teoría sabemos que las arenas no tienen plasticidad y es de vital importancia saber cómo influye la bentonita sódica en esta propiedad. El muestreo experimental con todas las proporciones se muestra en la Tabla 2, junto con la codificación de las probetas experimentales.

Tabla 2. Codificación de la muestra natural y experimental

Muestra		CÓDIGO
Suelo	Bentonita (%)	
Arena	0%	MN
	4%	BS+4%
	8%	BS+8%
	12%	BS+12%
	16%	BS+16%

El ensayo de compactación o Proctor Modificado se realizó para las muestras estándar y experimental, donde las mezclas se prepararon de forma homogénea con los porcentajes de bentonita mencionados. Cada espécimen se ensayó teniendo en cuenta el contenido óptimo de humedad (OMC) y la densidad seca máxima (MDD), que también se utilizarán para el ensayo de resistencia. Todos los resultados obtenidos se muestran en las curvas de compactación, que se compararán para determinar la variación del MDS y OMH de cada espécimen. El ensayo Proctor Modificado se realizó de acuerdo con las especificaciones de la norma peruana para este ensayo, según ASTM D1557.

Para el ensayo CBR se consideró el proceso de expansión de los especímenes. Por tratarse de arenas, éstas no presentan expansión ex, debido a la ausencia de partículas finas cohesivas (Abulimiti, Wang, Li, Zhang, & Li, 2023). Para el ensayo, las mezclas se prepararon con los datos obtenidos del ensayo Proctor Modificado. Asimismo, dentro del proceso de saturación, se tomaron lecturas a las 24, 48, 72 y 96 horas respectivamente. Las especificaciones utilizadas para este ensayo fueron extraídas de la norma peruana ASTM D1883.

Resultados y Discusión

Propiedades Físicas

Granulometría

La curva granulométrica de las muestras extraídas se muestra en la Figura 2, donde se especifica el porcentaje que pasa por los tamices N°200 y N°40. Asimismo, estos valores nos permitirán hallar el Coeficiente de Uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cc) para determinar la clasificación del material según la metodología AASHTO y SUCS. Los valores del contenido de humedad natural de las probetas también se muestran en este capítulo.

Para calcular los valores de Cc y Cu, necesitamos los diámetros del suelo por debajo de los cuales queda el 60, 30 y 10% de la muestra, siendo estos valores 0,25, 0,19 y 0,13 respectivamente. Según los valores obtenidos, el valor de Cc y Cu son 1,02 y 1,85. Asimismo, el contenido de humedad natural de la muestra es de 0,95%. La clasificación del suelo, según la metodología SUCS, es un suelo SP (Arena Pobremente Graduada) y un suelo A-3, en la metodología AASHTO.

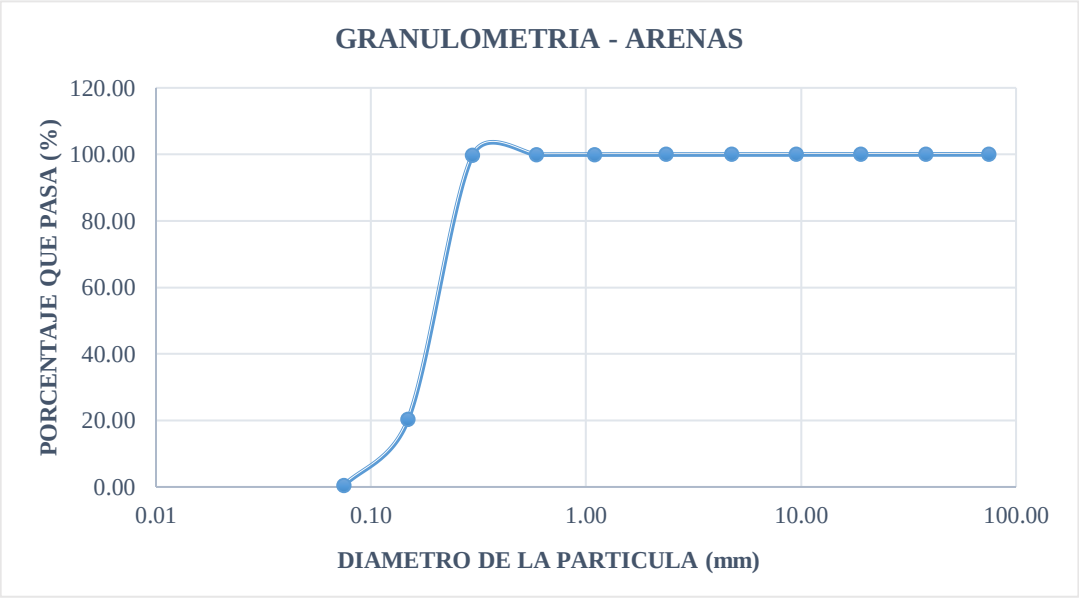

Figura 2. Curva granulometría de arena de duna

Plasticidad

Se evaluaron los límites líquido y plástico para las muestras natural y experimental, con el fin de analizar la variación del índice de plasticidad en cada una de las probetas, lo cual se muestra en la Tabla 3. Para la muestra patrón, no existe valor para el límite líquido y plástico, ya que las arenas en su estado natural no poseen partículas cohesivas que permitan la unión entre sus granos.

Se sabe que la adición de bentonita, al ser una arcilla expansiva, puede dar plasticidad a la mezcla. Sin embargo, se observa que con la adición del 4% y 8% de bentonita sódica, no hay cambios en el comportamiento de la plasticidad. Por otro lado, a partir de la adición del 12%, el límite líquido varía del 26,32% al 25,50% mientras que el límite plástico varía del 17% al 9,30%. En consecuencia, el índice de plasticidad aumenta del 9,32% al 16,20%. La figura 2 muestra el comportamiento del LL y del PL de las respectivas probetas ensayadas. Estos resultados nos permitirán deducir que se alcanzará una resistencia máxima con las adiciones de 12% y 16%, ya que, al presentar plasticidad, los granos de arena podrán unirse y formar estructuras más sólidas y resistentes. Asimismo, dentro del reglamento peruano de suelos y pavimentos, se menciona que, para tener una correcta estabilización de suelos, la muestra debe tener un índice de plasticidad mínimo. Esto se debe al hecho de que cuanto mayor es el índice de plasticidad, mayor es la compresibilidad del suelo y, en consecuencia, su resistencia. Cabe señalar que los índices de plasticidad con un 12% y un 16% de bentonita sódica se consideran materiales de plasticidad media, característicos de los suelos arcillosos y los suelos franco-arcillosos (Ojuri y Opeyemi, 2017).

Tabla 3. Límites de Atterbeg para suelos arenosos y con bentonita

MUESTRAS	Límites de Atterberg (%)		
	LL	LP	IP
MN	-	-	-
BS+4%	-	-	-
BS+8%	-	-	-
BS+12%	26.32%	17.00%	9.32%
BS+16%	25.50%	9.30%	16.20%

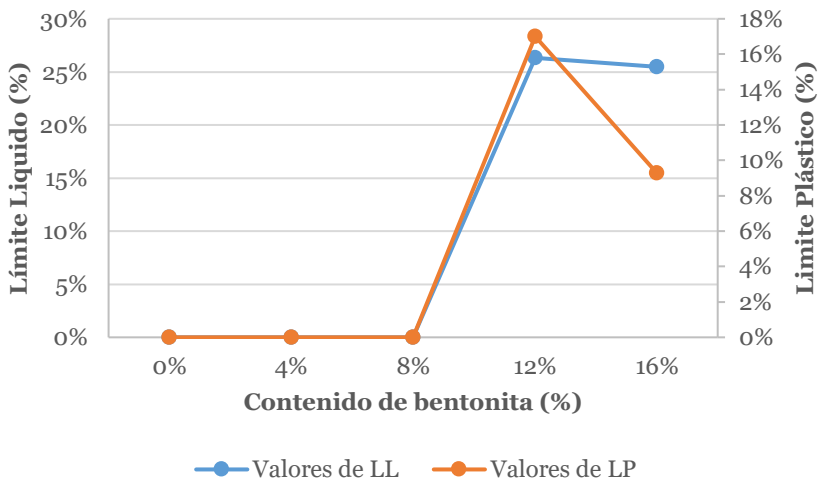

Figura 4. Variación de LL y LP para suelo natural y con bentonita

Propiedades Mecánicas

Proctor Modificado

En el ensayo de compactación, se tomaron 4 muestras por cada espécimen, como parte de la metodología del ensayo. Además, se tomaron 3 especímenes por cada contenido de bentonita para evaluar la variación en la prueba. Estas 3 muestras se tomaron en diferentes puntos de la misma zona. Los resultados se muestran en la Tabla 4, donde se especifican los valores de cada espécimen ensayado. Para el análisis y la interpretación, se tomó el valor medio de cada grupo dentro del muestreo estándar y experimental. Del mismo modo, la Figura 4 muestra la variación del contenido de humedad óptimo y de la densidad seca máxima de las probetas, así como sus curvas de compactación. Cabe señalar que los gráficos muestran los valores medios de las muestras naturales y experimentales.

Tabla 4. OMH y MDD de la muestra natural y experimental

MEDIDA	MUESTRA	MN	BS+4%	BS+8%	BS+12%	BS+16%
Máxima Densidad Seca (g/cm3)	**C1**	1.645	1.775	1.899	1.995	1.926
	C2	1.637	1.780	1.921	2.004	1.934
	C3	1.643	1.771	1.915	1.998	1.930
Optimo Contenido de Humedad (%)	**C1**	6.19	7.57	9.30	11.29	13.26
	C2	7.19	8.02	9.49	11.32	13.19
	C3	6.65	7.85	9.35	11.30	13.10

La densidad seca máxima tiene una variación de 1,645 g/cm3 a 1,926 g/cm3 desde la muestra natural a la muestra con 16% de bentonita, siendo el valor máximo de 1,998 g/cm3 para la adición del 12%. Asimismo, la humedad óptima oscila entre 6,70% y 13,10%, siendo la muestra con 16% de bentonita la más elevada. Esto se debe al aumento del contenido de bentonita en la muestra. Asimismo, el aumento del MDS explica que se produzca una mayor densificación de las partículas para ser compactadas. Por otro lado, el aumento de la humedad óptima está relacionado con el aumento del MDS ya que a esta humedad las partículas pueden ser compactadas. Sin embargo, la muestra de bentonita al 12% presenta la mayor densidad seca, que es la óptima en el ensayo de compactación. Este comportamiento se puede visualizar cuando se realiza una estabilización química, ya que la mejora de las propiedades no depende de la cantidad de material estabilizante, sino de las interacciones químicas que realizan al combinarse.

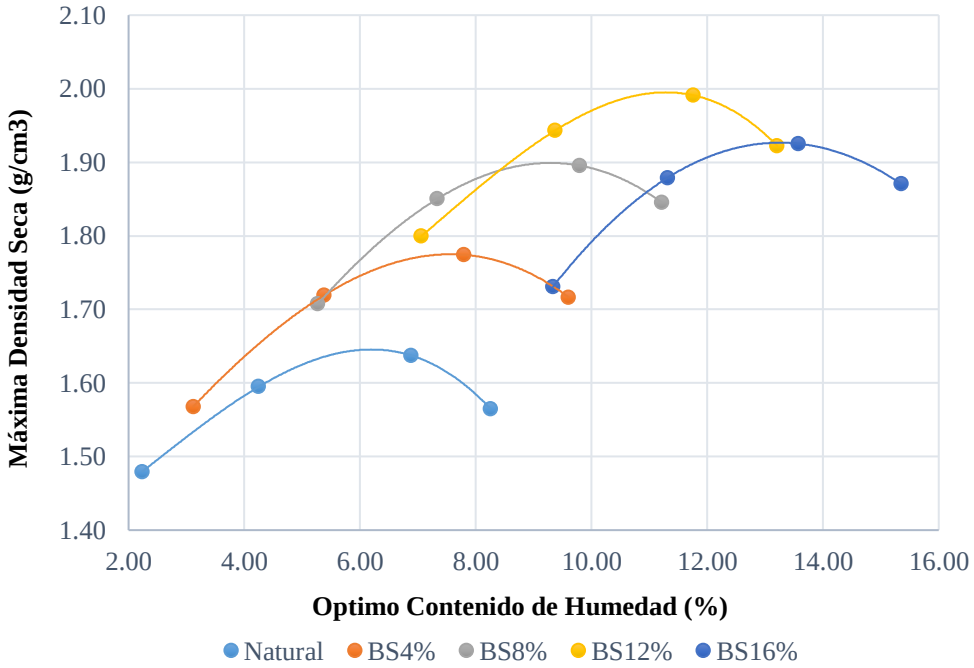

Figure 5. Curvas de compactación de muestra natural y experimental

El comportamiento de las muestras ensayadas se debe a la capacidad de la bentonita sódica para absorber grandes cantidades de agua. Un estudio reciente descubrió que en porcentajes superiores al 3% de bentonita, ésta aumentaba su capacidad de agua en un 10,2% (Abulimiti, Wang, Li, Zhang, & Li, 2023). Además, cuando entra en contacto con el agua, sus moléculas son atraídas para formar enlaces hídricos con los grupos hidroxilo de la bentonita. Esto explicaría por qué este material puede absorber hasta 10 veces su peso e hincharse hasta 18 veces su volumen. Este hecho está relacionado con los datos obtenidos en esta investigación, con el aumento del contenido de humedad de 6,37% a 13,17% y de la densidad seca máxima de 1,642 g/cm3 a 1,999 g/cm3. Por otro lado, un estudio realizado mostrando el modelado de probetas cilíndricas de arena y bentonita con métodos discretos 3D, afirma que la transferencia de fuerza interna aumenta en relación con el contenido de bentonita (Qin, Xu, & Lalit, 2021). Esto podría corroborar y seguir estudiando el comportamiento de las partículas en una estabilización química.

CBR + Expansión

De acuerdo con la Tabla 5, el valor de CBR para la muestra natural tuvo un valor de 9.70%. Luego de la adición de 4% de bentonita, el incremento en el valor del CBR es significativo, alcanzando un valor máximo de 18.50% para la adición de 12% de bentonita. Este resultado está relacionado con el obtenido en el ensayo de compactación, ya que la máxima densidad seca se obtuvo con un 12% de bentonita. Por otro lado, a partir de la adición del 16%, se obtiene una disminución del valor del CBR del 18,50% al 13,20%.

Tabla 5. Valores de CBR para muestra natural y experimental

MEDIDA	MUESTRA	MN	BS+4%	BS+8%	BS+12%	BS+16%
CBR 0.1” (%)	**C1**	9.53	12.09	14.93	18.65	13.65
	C2	9.80	12.60	15.22	19.60	13.02
	C3	9.95	12.33	14.90	18.93	12.85
CBR 0.2” (%)	**C1**	12.42	15.64	19.29	24.29	17.90
	C2	12.49	16.01	19.61	25.16	16.62
	C3	12.71	15.56	19.01	24.58	16.33

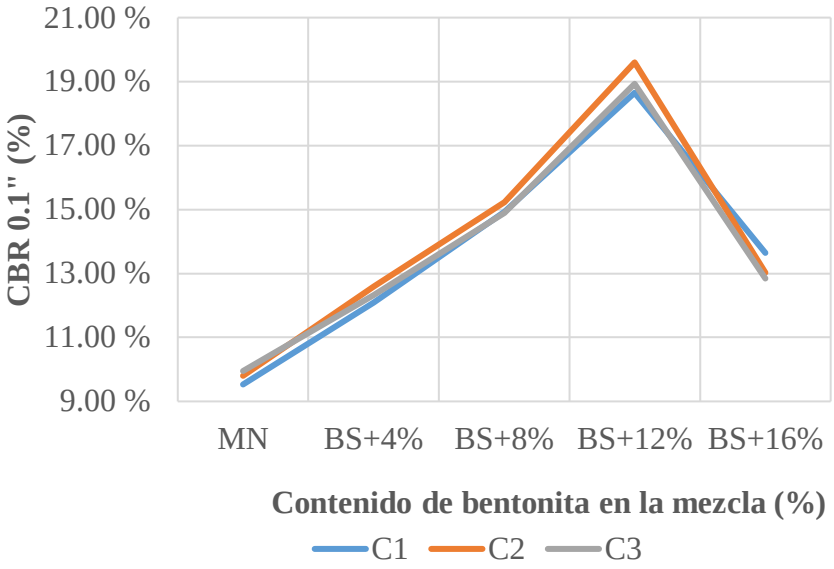

Figura 6. Valores de CBR para las muestras

Asimismo, en el proceso de saturación de las probetas durante 96 horas, se evaluó la expansión para medir la capacidad de hinchamiento de la bentonita sódica cuando se mezcla con arenas. La figura 4 muestra la variación de la expansión desde la muestra natural, que es arena sin expansión, hasta un valor de 2,41 mm con un contenido de bentonita del 16%. Esto demuestra que la bentonita sódica es capaz no sólo de dar plasticidad a la muestra, sino también de permitir que se hinche y ocupe más volumen. Sin embargo, el nivel de expansión debe controlarse para que no genere variaciones de volumen con la variación de agua. Este cambio continuo de volumen, aplicado a los pavimentos, podría provocar grietas y asentamientos diferenciales, que harían colapsar la estructura.

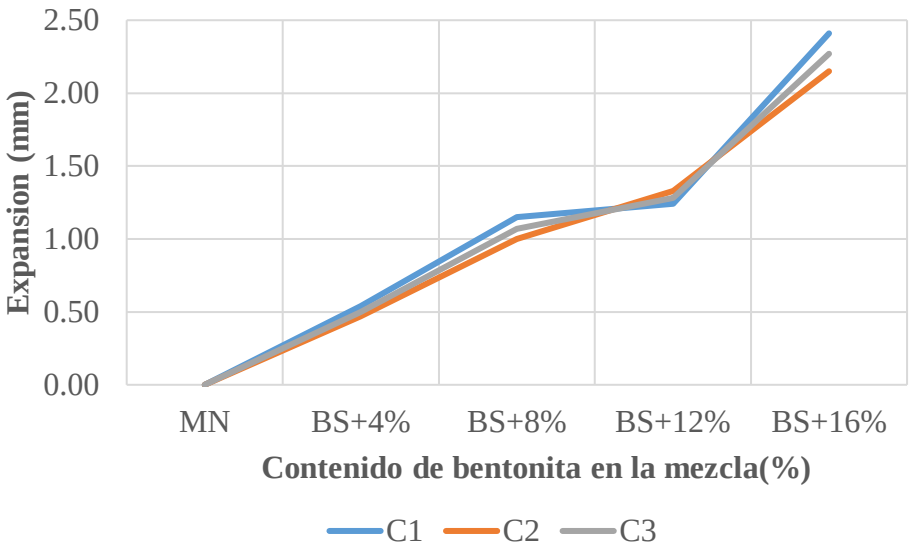

Figura 7. Variación de la expansión a las 96 horas

En relación con los ensayos, se demuestra un aumento de la resistencia o capacidad portante de las mezclas de hasta 2 veces su valor (9,76% a 19,06%). Investigaciones similares afirman que el contenido de bentonita y el tiempo de hidratación afectan a las propiedades mecánicas de las mezclas. Este fenómeno se observó entre el 5% y el 10% de bentonita, y se debió a la expansión de la bentonita en los poros de la arena, lo que provocó un cambio entre la interfaz arena-bentonita (Qin, Xu, & Lalit, 2021). Esta es una característica principal de los suelos granulares, que, al no tener cohesión, el comportamiento de sus partículas es totalmente diferente. El estudio de la forma de contacto entre sus partículas es importante para evaluar cómo afecta a las propiedades mecánicas de suelos granulares como la arena.

Por otro lado, como parte de la investigación, se evaluó que el incremento en el valor del CBR hace que el suelo estabilizado sea apto para ser utilizado como subrasante en proyectos viales, el cual es clasificado como una subrasante regular o buena. Sin embargo, tener algunas consideraciones importantes como el índice de tráfico o el tipo de carretera para el que debe ser diseñado es de importancia en la elaboración del proyecto.

Conclusiones

- Se determinó mediante las pruebas físicas que la muestra natural era una arena pobremente graduada (SP) o suelo A-3, con un índice de plasticidad 0, debido a la ausencia de partículas cohesivas. También se determinó que la adición de 12% o más de bentonita sódica añadía plasticidad a la mezcla, lo cual es un factor importante en la estabilización del suelo. Con una adición del 16% de bentonita, se alcanzó un índice de plasticidad del 16,34%, el más alto.
- Asimismo, la adición de bentonita sódica aumentó la densidad seca máxima de 1,642 g/cm3 de la muestra natural a 1,999 g/cm3 con una adición del 12%. Asimismo, la humedad requerida relativa a la MDS aumentó progresivamente del 6,67% al 13,18%, debido a la capacidad de la bentonita para absorber grandes cantidades de agua. Se determinó que la dosificación óptima, con la que se consiguen mayores valores de MDS, es con un 12% de bentonita.
- Asimismo, se observa una mejora en la capacidad portante del suelo arenoso, alcanzando un incremento del 9,76% al 19,06% del valor CBR, con una adición del 12% de bentonita.
- Igualmente, se evaluó la expansión de las muestras, ya que las arenas en su estado natural no presentan esta propiedad, obteniéndose un incremento de hasta 2,5 mm respecto a su volumen inicial con la mayor dosificación de bentonita. La dosificación óptima que alcanzó altos valores de CBR fue del 12%.

Referencias

[1] S. Raju, S. Kolathayar y A. Kumar Sharma, «Strenght behavior of subgrade soil mixed with sand manufacturing dust and fiber,» *Journal of GeoEngineering,* vol. XII, nº 2, pp. 79-84, Junio 2018.

[2] R. Proia, P. Croce y G. Modoni, «Experimental investigation of compacted sand-bentonite mixtures,» *Procedia Engineering,* vol. 158, pp. 51-56, 2016.

[3] O. Ojuri y O. Opeyemi, «Strength and Hydraulic Conductivity Characteristics of Sand-Bentonite Mixtures Designed as a Landfill Liner,» *Jordan Journal of Civil Engineering ,* vol. XI, nº 4, pp. 614-622, 2017.

[4] M. Y. Fattah y A. H. Al-Lami, «Behavior and characteristics of compacted expansive unsatured bentonite-sand mixture,» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* vol. VIII, nº 5, pp. 629-639, 2016.

[5] S. Islam, N. Hoque, M. Uddin y M. Chowdhury, «Strength Development in Clay Soil Stabilized with Fly Ash,» *Jordan Journal of Civil Engineering,* vol. XII, nº 2, pp. 188-201, 2018.

[6] A. M. Jawad Alhassani, «Improvement of Sandy Soil Using Materials of Sustainable Consideration,» *Jordan Journal of Civil Engineering,* vol. 15, nº 4, pp. 623-632, 2021.

[7] M. Bani Baker, R. Abendeh, A. Sharo y A. Hanna, «Stabilization of Sandy Soils by Bentonite Clay Slurry at Laboratory Bench and Pilot Scales,» *Coatings,* vol. 12, pp. 1-15, 2022.

[8] Ç. C. Ceylan y Ö. Yıldız, «Stabilization of Zeolite and Bentonite with Sewage Sludge Ash,» *Periodica Polytechnica Civil Engineering,* vol. 67, nº 2, pp. 431-443, 2023.

[9] W. Sun, C. Liu, D. Yang y D. Sun, «Evaluation of hydro-mechano-chemical behavior of bentonite-sand mixtures,» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* vol. 14, pp. 637-652, 2022.

[10] Y. Qin, D. Xu y B. Lalit, «Effect of Bentonite Content and Hydration Time on Mechanical Properties of Sand-Bentonite Mixture,» *Applied Sciences,* pp. 1-17, 2021.

[11] M. Elsawy, «Performance of Sand Dunes in stabilizing highly Expansive Soil,» *Journal of GeoEngineering,* vol. 16, nº 1, pp. 23-34, Marzo 2021.

[12] M. Abulimiti, J. Wang, C. Li, Y. Zhang y S. Li, «Bentonite could be an eco-friendly windbreak and sand-fixing material,» *Enviromental Technology & Innvoation,* vol. 29, pp. 1-12, 2023.