

Evaluation of the effect of eggshell powder on the physical and mechanical properties of clay soils for shallow foundations

Jhordan E. Berrocal Muñoz¹ ; Kevin R. Becerra Huaytalla² ; Efrain E. Limaylla Santiago³ 

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil, Lima - Perú

U20242242@utp.edu.pe, U19312707@utp.edu.pe, C24946@utp.edu.pe

Abstract– Clay soils present a challenge in civil engineering due to their high plasticity, significant volumetric changes, and low stiffness, leading to settlement, bulging, and cracking in constructed structures. In Lima, Peru, districts like Ate have alluvial soils composed of highly plastic, low-consistency clays, which compromise the soil's bearing capacity and increase its seismic vulnerability. Furthermore, stabilizers such as cement and lime have high energy costs and CO₂ emissions. Therefore, the objective of this research is to determine the effect of eggshell powder (ESP), due to its high CaCO₃ content, on the soil's shear strength parameters, evaluating its viability as a sustainable stabilizer for shallow foundations. To this end, Atterberg limits, Proctor compaction, and direct shear tests were performed in the laboratory using samples with 0%, 15%, 25%, and 35% ESP by weight of clay soil. The results showed a reduction in both the plasticity index (from 16% to 8%) and cohesion (from 25.2 kPa to 16.6 kPa), while the angle of internal friction increased from 5.8° to 12.1° and the soil's allowable bearing capacity improved to 146.30 kPa. These findings confirm the potential of ESP as an economical, environmentally friendly, and viable stabilizer for shallow foundations, promoting sustainable geotechnical practices that valorize waste and reduce the carbon footprint of construction.

Keywords-- Eggshell powder, Soil stabilization, Shear strength, Clay soils, Shallow foundations

Evaluación del efecto del polvo de cáscara de huevo en las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos para cimentaciones superficiales

Jhordan E. Berrocal Muñico¹ ; Kevin R. Becerra Huaytalla² ; Efrain E. Limaylla Santiago³ 

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil, Lima - Perú

U20242242@utp.edu.pe, U19312707@utp.edu.pe, C24946@utp.edu.pe

Resumen– Los suelos arcillosos representan un desafío en ingeniería civil debido a su alta plasticidad, cambios volumétricos significativos y baja rigidez, provocando asentamientos, abultamientos y agrietamientos en estructuras construidas. En Lima Perú, distritos como Ate, presentan suelos aluviales de arcillas de alta plasticidad y baja consistencia, lo cual compromete la capacidad portante del terreno y aumenta su vulnerabilidad sísmica. Sumado a ello, estabilizantes como el cemento y la cal tienen elevados costos energéticos y emisiones de CO₂. Frente a ello, el objetivo de esta investigación es determinar el efecto del polvo de cáscara de huevo (ESP) por su alto contenido de CaCO₃ en los parámetros de resistencia al corte del suelo, evaluando su viabilidad como estabilizante sostenible para cimentaciones superficiales. Para ello, en laboratorio se realizaron pruebas de límites de Atterberg, compactación Proctor y corte directo, empleando muestras con 0%, 15%, 25% y 35% de ESP en peso de suelo arcilloso. Los resultados mostraron una reducción tanto del índice de plasticidad de 16 % a 8 % y la cohesión de 25.2 kPa a 16.6 kPa, mientras que el ángulo de fricción interna se incrementó de 5.8° a 12.1° y hubo una mejora de la capacidad admisible del suelo hasta 146.30kPa. Estos hallazgos confirman el potencial del ESP como un estabilizante económico, ecológico y viable para cimentaciones superficiales, promoviendo prácticas geotécnicas sostenibles que valoricen residuos y reduzcan la huella de carbono en la construcción.

Palabras clave-- Polvo de cáscara de huevo, Estabilización de suelos, Resistencia al corte, Suelos arcillosos, Cimentaciones superficiales

I. INTRODUCCIÓN

Los suelos arcillosos presentan importantes desafíos técnicos en ingeniería debido a sus propiedades intrínsecas, que incluyen una elevada absorción de agua, baja rigidez, alta plasticidad y reducida resistencia al corte [1]. En particular, los suelos arcillosos blandos tienden a volverse muy rígidos en condiciones secas, pero pierden firmeza cuando se humedecen [2]. Los notables cambios volumétricos que experimentan estos suelos constituyen un riesgo para las estructuras, ya que sus efectos se manifiestan durante la fase constructiva e incluso en el post construcción [3]. Dicho comportamiento dual de expansión y contracción genera asentamientos diferenciales que, a su vez, provocan levantamientos y agrietamientos en las infraestructuras edificadas sobre estos terrenos [4].

En el caso de Perú, este problema tiene una importancia particular, pues en la capital de Lima, los estudios de

microzonificación sísmica efectuados por instituciones de cooperación entre Perú y Japón revelaron que zonas como el distrito de Ate, situado dentro del valle del río Rímac, se encuentran sobre suelos de baja consistencia, lo cual incrementa su vulnerabilidad ante sismos y cargas estructurales [5]. De manera similar, en sectores como Santa Clara, San Juan de Pariachi, antiguamente utilizados como terrenos de cultivo, los depósitos aluviales son ricos en arcillas de alta plasticidad y suelos blandos propensos a asentamientos y amplificación sísmica. Esta situación se traduce en baja capacidad portante y riesgos para edificaciones y pavimentos urbanos [6].

La estabilización de estos suelos puede abordarse mediante métodos mecánicos o químicos. No obstante, ambas estrategias presentan desventajas importantes. Por un lado, los tratamientos mecánicos suelen exigir elevados costos y un alto consumo energético [1]. Por otro lado, los métodos químicos incrementan la energía incorporada al material y generan emisiones significativas de CO₂ debido a las reacciones de hidratación, resultando ambientalmente perjudiciales [7]. En consecuencia, resulta crítico encontrar alternativas más económicas, ecológicas y efectivas para mejorar los suelos arcillosos. Tradicionalmente los métodos de estabilización química a menudo se basan en materiales como cal y cemento, que, a pesar de su eficacia, plantean importantes preocupaciones ambientales. En respuesta a ello, diversos estudios han explorado alternativas sostenibles, incluyendo el uso de materiales energéticamente eficientes, económicos y ambientalmente sostenibles, tales como bioenzimas comerciales, técnicas de biocementación, el uso de cenizas volantes y geopolímeros basados en subproductos industriales, nanomateriales y residuos ricos en CaCO₃ como polvo de cáscara de huevo [3], [8], [17]. La ventaja de utilizar materiales reciclables radica en que se genera menor consumo de energía y menores emisiones de CO₂ [8].

Entre todos los tipos de residuos biomateriales la cáscara de huevo ha generado gran atención como residuo biológico de bajo coste [9]. En Perú, podría reducir la huella ambiental en la construcción; ya que su producción anual en el 2022 alcanzó las 510 962 toneladas [10]. El cascarón del huevo de las aves está constituido por una envoltura de origen mineral, compuesta principalmente por carbonato de calcio, el cual se encuentra embebido en una matriz orgánica formada por proteínas [10].

La composición química del polvo de cáscara de huevo se compone predominantemente, hasta en un 93 y 94 % de CaCO_3 [11], [12], [13]. En tal sentido, la cáscara de huevo se ha convertido en un prometedor material cementante de origen biológico en aplicaciones de ingeniería [14].

La revisión compilada de la literatura evidencia que materiales ricos en CaCO_3 , como el residuo pulverizado del cascarón de huevo, propician una mejora en la respuesta mecánica de los suelos arcillosos. Se ha observado un aumento en los valores a la compresión no confinada UCS y CBR, así como mejoras en los parámetros de corte, además de una reducción en la plasticidad del suelo al emplear dosificaciones adecuadas o combinaciones con activadores. [2], [15].

Los estudios recopilados integran distintos aditivos en combinación con el polvo de cáscara de huevo, aplicados mediante procedimientos de mejoramiento del suelo, orientados a optimizar las propiedades geotécnicas del suelo. Por ejemplo, se ha combinado ceniza de bagazo de caña, polvo de cáscara de huevo y cal como estabilizantes de suelos frágiles con el fin de mejorar el desempeño de cimentaciones en obras civiles [16]. En otra investigación se mezcló polvo de piedra caliza molida, polvo de cáscara y ceniza de cáscara de huevo en arcilla blanda, obteniéndose incrementos favorables en la resistencia mecánica del material. De manera análoga, la adición de restos de mármol pulverizado, cenizas volantes, agregados pétreos, cal y ESP mejoró las propiedades geotécnicas de suelos expansivos; además de las mejoras mecánicas se destacaron los beneficios en sostenibilidad y viabilidad práctica en el campo [15], [17]. Asimismo, se ha desarrollado una mezcla geopolimérica de cenizas volantes y ESP, en la cual se estudió la molaridad de la solución alcalina de NaOH; estos esfuerzos evidenciaron el potencial de dichas mezclas para aumentar la estabilidad y el comportamiento mecánico de suelos problemáticos [18]. También se ha explorado el uso sinérgico de métodos biocalcáreos. Por ejemplo, la Precipitación Inducida de Carbonato EICP, una técnica enzimática que genera, CaCO_3 in situ se ha combinado con polvo de cáscara de huevo. En suelos expansivos, esta combinación de EICP y ESP produjo aumentos en la resistencia mecánica [12]. De igual modo, se compararon distintos estabilizantes naturales como la ceniza de cáscara de huevo, ESP y piedra caliza concluyéndose que la mezcla constituye una alternativa eficiente, ecológica y eficaz [3], [15]. No obstante, diversas investigaciones, han evaluado el impacto de ESP de manera aislada en suelos arcillosos blandos para las mejoras de los parámetros mecánicos del suelo. [2], [13], [19], [20].

Por otra parte, las dosificaciones de aditivos empleados en la estabilización del suelo varían significativamente según el tipo de activador y los objetivos del estudio. En [19] se incorporó ESP en proporciones del 5 %, 10 % y 15 %, con el propósito de evaluar el efecto sobre la resistencia mecánica del suelo. De forma similar, en [17] aplicaron un enfoque progresivo con dosificaciones de 0 % a 5 %, en incrementos de

1 %, de ESP, evaluando así el efecto creciente del aditivo en las propiedades del suelo.

De igual forma, la referencia [15] prepararon mezclas de suelo con distintos porcentajes de piedra caliza (4 %, 8 %, 12 %, 16 %, 20 %) y de ESP en (4 %, 8 %, 12 %, 16 %, 20 %) y ESA (polvo de cáscara huevo calcinado) en una proporción constante del 26 %, analizando su efecto combinado en la estabilidad del material. Como se reporta en [3], se evaluaron dosificaciones de cal (0 %, 1 %, 3 %, 6 %, 9 %) y ESP (0 %, 4 %, 8 %, 12 %, 16 %), destacando el comportamiento sinérgico entre ambos aditivos. Del mismo modo, en [13] emplearon una metodología experimental con proporciones de 0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 8 % y 10 % de residuos de cáscara de huevo, para determinar su incidencia en la mejora de suelos arcillosos. Por su parte, el estudio presentado por [1] utilizó un 14 % de ESP como valor óptimo, junto con la técnica EICP, variando concentraciones entre 0.5 y 1.5 mol/L, siendo 0.75 mol/L el nivel óptimo identificado. Asimismo, en [21] trabajaron con adiciones de ESP calcinado y sin calcinar en proporciones de 0 %, 6 %, 8 %, 10 % y 12 %, comparando el efecto térmico sobre la reacción del material. En el caso de la referencia [2] se implementaron porcentajes crecientes de ESP entre 2 % y 20 %, con incrementos del 2 %, para observar la variación gradual en las propiedades del suelo. Finalmente, como se reporta en [16] trabajaron con ESP en proporciones de 0 %, 3 %, 6 %, 9 %, 12 %, 15 % y 18 % junto con 20 % de ceniza de bagazo de caña y diferentes fracciones de cal; mientras que en [20] evaluaron dosificaciones de 0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 %, 12 % y 14 % de ESP, determinando los rangos más eficientes en la estabilización.

En los estudios mencionados se emplea de forma rutinaria ensayos geotécnicos de caracterización básica de contenido de agua, granulometría, densidad relativa y propiedades de plasticidad, como los límites de Atterberg, para describir la naturaleza y plasticidad de las muestras [1-3], [13], [15-22]. Las pruebas de compactación de Proctor se utilizaron de manera generalizada buscando determinar los factores de humedad ideal y densidad seca de mayor valor para examinar la influencia de los aditivos en el comportamiento del suelo [1], [3], [13], [15-22]. Para evaluar la resistencia y el comportamiento mecánico se aplicaron ensayos triaxiales incluyendo la prueba no consolidado y no drenada UU [2], [15], [18], ensayos de corte directo [1], [13], [16], [17], determinaciones de resistencia no confinada UCS [1], [3], [20-22] y pruebas CBR orientadas a aplicaciones de pavimentación [1], [3], [16], [17], [21]. Las investigaciones que estudiaron deformaciones y consolidación incorporaron ensayos oedométricos de consolidación unidimensional y pruebas de colapso y succión para estimar compresibilidad y asentamientos [1], [2]. Asimismo, se emplearon ensayos de permeabilidad en laboratorio y análisis de campo para conectar resultados de laboratorio con comportamiento in situ [1], [13], [21]. Complementariamente, numerosos trabajos integraron análisis microestructurales y químicos SEM, XRD y determinaciones químicas del elemento CaCO_3 para explicar los mecanismos de

mejora y los cambios en la matriz del suelo a escala microscópica [1], [2], [13], [21-22]. En conjunto, la combinación repetida de caracterización básica, compactación, ensayos de resistencia, consolidación y microanálisis constituye un marco metodológico robusto y reproducible para evaluar la eficacia de aditivos como el ESP y otras alternativas sostenibles [1-3], [13], [15-22].

Si bien el mejoramiento de suelos con ESP está documentado a nivel global como Indonesia, Irak, Taiwán, China, Argelia, Egipto, Estados Unidos y Corea [1], [2], [13], [15], [17], [18], [20], [21], [22]. Este enfoque sostenible también se ha explorado en la región particular de Latinoamérica; a modo de ejemplo, en Brasil se ha evaluado la viabilidad de la cal derivada de cáscara de huevo como aglutinante alternativo para suelos expansivos [23]. En Ecuador, investigaciones recientes han analizado el uso del carbonato de calcio como estabilizador de subrasantes arcillosos en proyectos viales [24]. No obstante, en el Perú, los estudios sobre la aplicación del ESP son escasos. Las pocas investigaciones identificadas se centran en la estabilización de subrasantes para proyectos viales [25], dejando de lado dos aspectos críticos.

Primero, existe una brecha en la investigación de su aplicación en cimentaciones superficiales para edificaciones, aspecto que esta investigación busca abordar. Segundo, la literatura consultada se limita a explorar porcentajes de ESP generalmente inferiores al 20%, sin evaluar el impacto de dosificaciones más altas. Atender estas brechas es indispensable para determinar la eficacia del ESP y fomentar su incorporación en prácticas de construcción sostenibles dentro del sector peruano.

En este sentido, se identifica una brecha clara en el conocimiento relacionada con la evaluación del comportamiento mecánico de suelos arcillosos estabilizados con ESP en aplicaciones de cimentaciones superficiales, así como en el análisis de rangos de dosificación superiores a los comúnmente estudiados.

Por ello, la presente investigación busca evaluar la influencia del ESP en el comportamiento al corte del suelo arcilloso en el distrito de Ate, sector Santa Clara, San Juan de Pariachi, considerando su potencial eficacia como material estabilizante para cimentaciones superficiales. Se ejecutaron distintos ensayos geotécnicos, tales como el corte directo consolidado drenado, los límites de Atterberg y de compactación Proctor estándar, con el fin de establecer las características de consistencia y las condiciones óptimas de compactación del suelo.

Además, la dosificación de ESP se incorporó en proporciones de 0%, 15%, 25% y 35% en peso. La elección de estos intervalos es el resultado tanto de los hallazgos documentados en la literatura como de una decisión experimental destinada a investigar conductas que no han sido estudiadas en profundidad. Varios estudios anteriores han examinado la aplicación de ESP en suelos arcillosos utilizando dosis que tienden a ser menores al 20%, con aumentos

graduales de entre el 2% y el 20%, observando mejoras en las características mecánicas y de plasticidad dentro de esos rangos [2], [13], [17], [20]. No obstante, existe una investigación limitada sobre cómo se comporta el suelo ante cantidades más grandes de este material, sobre todo en aplicaciones que tienen que ver con cimentaciones superficiales.

En este marco, el estudio actual sugiere incrementar el rango de análisis al incluir porcentajes del 25% y del 35%, con la finalidad de valorar la evolución de los parámetros geotécnicos más allá de los límites que se reportan habitualmente y averiguar si hay una mejora adicional o un límite crítico en el comportamiento.

II. METODOLOGÍA

A. Suelo utilizado

El material empleado en este estudio corresponde a un suelo predominantemente arcilloso representativo de la región de Pariachi, delimitado en el sector de Santa Clara, dentro del distrito de Ate, provincia de Lima, Perú. Con coordenadas UTM WGS84 Norte: 8671211.00 m Este: 295930.00 m. La Fig. 1 presenta la ubicación geográfica del área de muestreo.

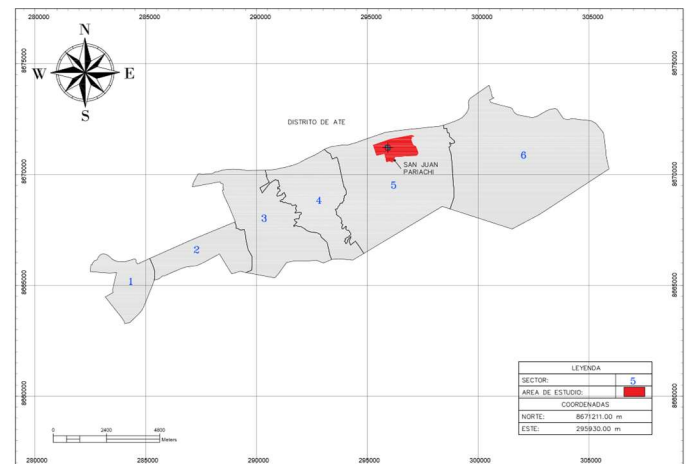


Fig. 1. Geolocalización del área en estudio

Para la elección y obtención del suelo, se siguieron los procedimientos indicados establecidos en la normativa técnica del Perú E.050 y en la norma ASTM D420-18 [26], [27] respectivamente. El proceso inició con el reconocimiento del terreno y la limpieza superficial del área según lo mostrado en la Fig. 2. Seguidamente, se excavó una calicata a 2.5 metros de profundidad, lo que permitió acceder a un estrato representativo y facilitar la recolección del material. Se obtuvieron cuatro muestras de aproximadamente 30 kilogramos cada una.

Las muestras recolectadas fueron almacenadas en bolsas herméticas para evitar alteraciones en su contenido de humedad y luego trasladadas al laboratorio SEICAN. En el cual se prepararon mezclas de suelo con diferentes porcentajes de ESP: 0 %, 15 %, 25 % y 35 %, con el fin de analizar comparativamente su comportamiento.



Fig. 2. Suelo recolectado

B. Cáscara de huevo

Las cáscaras de huevo utilizadas como material estabilizante se recolectaron en restaurantes y pastelerías del distrito de Ate, Lima. Luego se sometieron a un proceso de desinfección y limpieza, que consistió en la inmersión de una mezcla de hipoclorito de sodio al 5.5% por cada 15 L de agua, durante un periodo de 24 horas, con el propósito de eliminar residuos orgánicos y posibles contaminantes superficiales [21]. Posteriormente, se secó el material a la intemperie durante siete días, hasta alcanzar una consistencia seca. Una vez secas, las cáscaras se sometieron a un proceso de trituration mecánica mediante un molino manual hasta su pulverización, con el objetivo de obtener un polvo fino pasante por el tamiz N°200 (75 μ m) como se aprecia en la Fig. 3.



Fig. 3 Producción de ESP: (a) Material de cáscara de huevo sumergido en hipoclorito, (b) Secado a la intemperie, (c) Molienda en molinillo, (d) ESP pulverizado.

Las cáscaras procesadas se encontraban libres de proteínas y materia orgánica [3]. Para la caracterización química del polvo de cáscara de huevo se tomaron como referencia estudios previos. Los hallazgos obtenidos coinciden que el material está compuesto principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3) en proporciones que oscilan entre 93 % y 94 % [11], [12], [13]. Los resultados comparativos de la composición química se especifican en la Tabla I.

C. Pruebas físicas

El desarrollo de los ensayos de laboratorio se efectuó bajo los criterios establecidos en los estándares internacionales ASTM D2487 [34], ASTM D422 [28], ASTM D4318 [29]. Para las mezclas ensayadas se utilizaron proporciones de ESP del 0 %, 15 %, 25 % y 35 % permitiendo realizar un análisis comparativo entre el material natural y el modificado, como se ilustra en la Fig. 4.

TABLA I
ESTRUCTURA MOLECULAR DE ESP

Minerales	Ref. [11]	Ref. [1]	Ref. [13]
CaCO_3	93.9–96.9	93.28	94.78
Materia Orgánica	3.1–4.4	-	-
MgO	0.84	2.15	0.983
SO_3	0.67	1.13	1.094
P_2O_5	0.44	1.65	0.205
Al_2O_3	0.16	0.09	0.005
K_2O	0.09	-	0.096
SiO_2	0.08	1.16	0.318
Cl_2O_3	0.07	-	-
SrO	0.05	-	-
Fe_2O_3	-	0.02	-
MnO	-	-	0.004
Na_2O	-	-	2.514
Otros	-	0.52	-
Total	100.00 %	100.00%	100.00%

Nota: Compuestos de minerales principales, destacando carbonato de calcio CaCO_3 .

1) *Análisis granulométrico*: La primera etapa de la caracterización del suelo consistió en la ejecución del análisis granulométrico, conforme a la norma ASTM D422 [28]. La finalidad fue hallar los tamaños de partículas presentes en la muestra, diferenciando los residuos entre gravas, arenas, limos y arcillas, lo cual permitió clasificar el material y estimar el desempeño mecánico en función de su estructura granulométrica.

2) *Límites de Atterberg*: Seguidamente, se ejecutaron ensayos tomando como referencia la norma ASTM D4318 [29]. Esta prueba se realizó a fin de identificar la consistencia y plasticidad del suelo, mediante la determinación del índice de

plástico (IP) que comprende el límite líquido (LL) y el límite plástico (PL), parámetros que clasifican y definen la naturaleza del material.

D. Pruebas mecánicas

El desarrollo de los ensayos de laboratorio se efectuó bajo los criterios establecidos en ASTM D558 [30] y ASTM D3080 [31], con la intención de examinar los aspectos mecánicos que caracterizan al suelo y las mezclas estabilizadas con ESP.

1) *Proctor Estándar*: Se efectuó la compactación del suelo de acuerdo con las directrices señaladas en la norma ASTM D558 [30]. El ensayo posibilitó analizar la relación existente entre humedad ideal y densidad seca en el valor máximo del material, determinando tanto la densidad seca máxima alcanzada y como el contenido nivel de humedad ideal OMC, valores clave para regular el proceso de compactación.

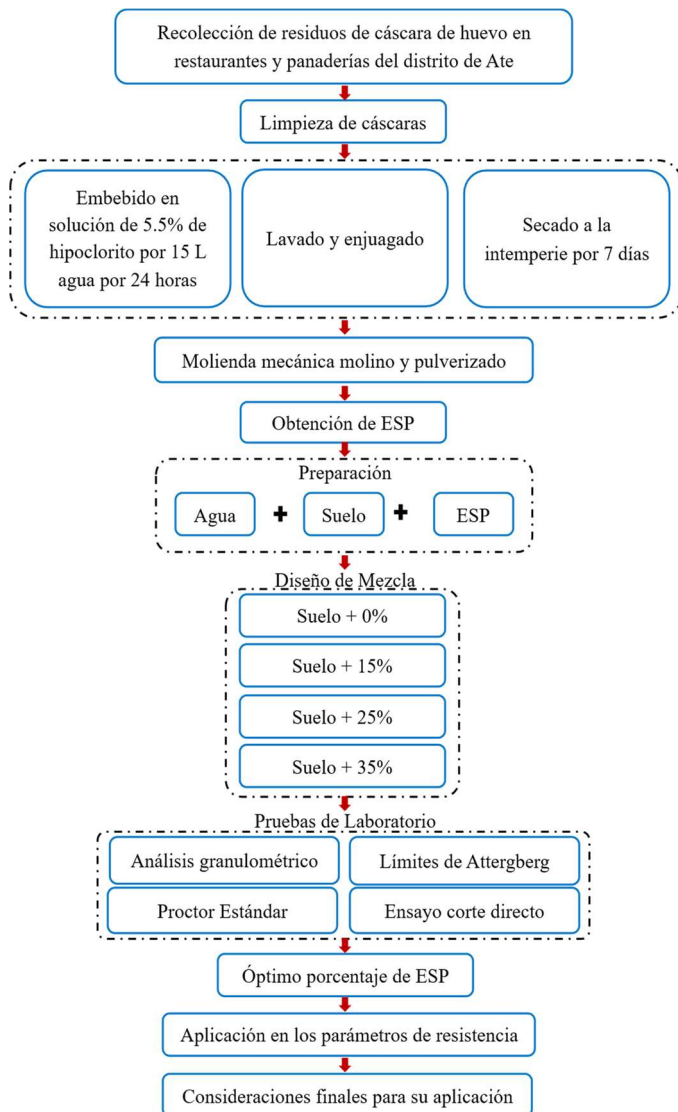


Fig. 4 Diagrama de flujo de la metodología de investigación

2) *Corte directo*: Conforme a la norma ASTM D3080 [31], el ensayo de corte directo se realizó bajo condición consolidado drenado (CD), empleando muestras recompactadas de suelo natural y suelo estabilizado con diferentes porcentajes de ESP. Previamente al corte, las muestras fueron consolidadas bajo esfuerzos normales de 50, 100 y 150 kPa, permitiendo la disipación de presiones de poro. Posteriormente, se aplicó el esfuerzo cortante mediante un desplazamiento horizontal controlado a una velocidad constante de 0.50 mm/min, asegurando condiciones drenadas durante todo el ensayo.

Durante la prueba se registraron la deformación horizontal, la fuerza aplicada y el esfuerzo cortante hasta la falla de la muestra (Fig. 5). A partir de las curvas esfuerzo cortante–deformación, se determinó el esfuerzo cortante máximo ($\tau_{\text{máx}}$) para cada nivel de carga normal, con lo cual se construyó la envolvente de resistencia al corte en el plano τ – σ . Esto permitió obtener los parámetros de resistencia del suelo, cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ), conforme al criterio de Mohr-Coulomb, evaluando así la influencia del contenido de ESP en el comportamiento mecánico del suelo.



Fig. 5 Prueba de Corte directo

3) *Cálculo de Capacidad Admisible*: La capacidad portante admisible del suelo se determinó a partir de los parámetros de resistencia al corte obtenidos en el ensayo de corte directo, específicamente la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ). Para ello, se empleó la ecuación de capacidad portante última propuesta por Meyerhof para cimentaciones superficiales:

$$q_u = c'N_c s_c d_c i_c + qN_q s_q d_q i_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad (1)$$

Donde q_u es la capacidad portante última, c' es la cohesión del suelo, q es el esfuerzo efectivo al nivel de desplante, γ es el peso específico del suelo, B es el ancho de la cimentación, N_c , N_q , N_γ son factores de capacidad de carga, s_c , s_q , s_γ son factores

de forma, d_c , d_q , d_γ son factores de profundidad y, i_c , i_q , i_γ son factores de inclinación.

Posteriormente la capacidad admisible se obtuvo del cociente entre la capacidad última y un factor de seguridad, que generalmente y por credibilidad, es 3.

$$q_{adm} = \frac{q_u}{FS} = \frac{q_u}{3} \quad (2)$$

Los valores de ϕ y c para el estudio actual se adquirieron a través de pruebas de corte directo, mientras que los factores de capacidad portante fueron calculados con base en el ángulo de fricción interna. El análisis permitió calcular la capacidad aceptable del terreno para cada porcentaje de ESP evaluado, determinando de esta manera el efecto que tiene el estabilizante en la conducta portante del material.

III. RESULTADOS

A. Propiedades físicas

La Fig. 6 se refiere a la determinación del límite líquido del suelo, que se obtiene a través de la relación entre el contenido de humedad y el número de golpes. Con base en esta curva, se calculó un límite líquido de 38.55 %, que indica la cantidad de humedad en la que el suelo cambia del estado plástico al estado líquido. Para clasificar el suelo y evaluar cómo se comporta ante cambios de humedad, este parámetro es crucial.

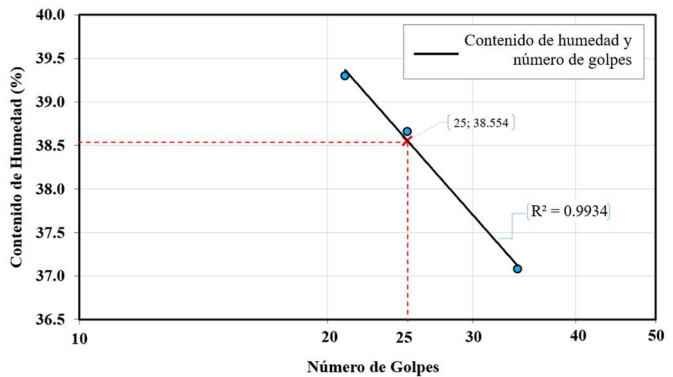


Fig. 6 Porcentaje de contenido de humedad.

Considerando los valores experimentales obtenidos durante el trabajo de laboratorio, se identificó que el suelo pertenece, al grupo de arcillas con plasticidad media (CL), conforme al sistema de clasificación SUCS. Asimismo, según la clasificación AASHTO el material pertenece al grupo A-6 (10) como se observa en la Fig. 7. El análisis granulométrico mostró una distribución relativamente uniforme del tamaño de las partículas, como se aprecia en la Fig. 8. La composición del suelo se encuentra constituida por un 89,4 % de arcilla y un 10,6 % de arena. La Tabla II detalla las propiedades físicas del suelo natural, cuyos valores de LL, LP e IP son 39,0 %, 23,0 % y 16,0 % respectivamente.

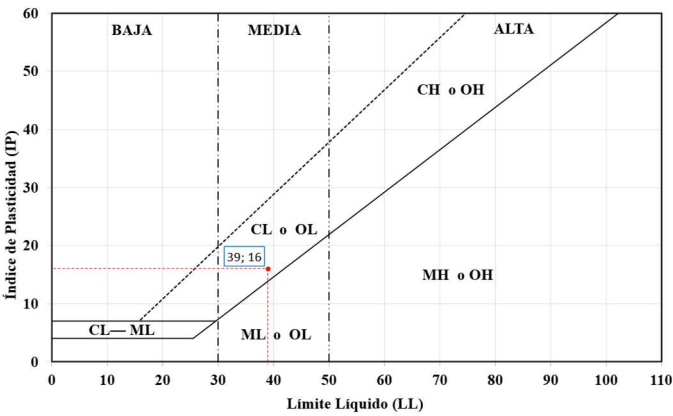


Fig. 7 Carta de plasticidad

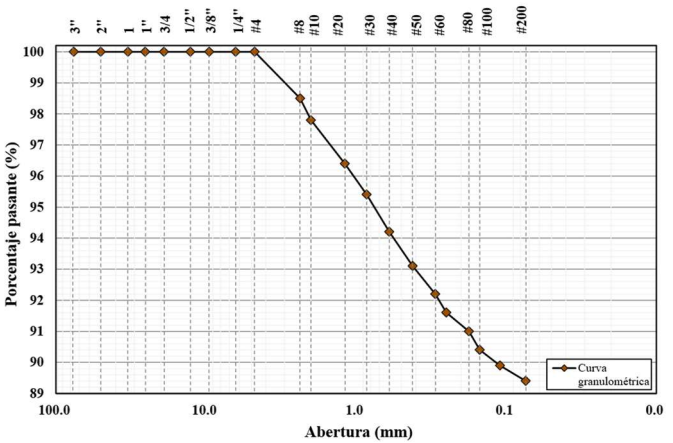


Fig. 8 Granulometría

TABLA II
PROPIEDADES DEL SUELO

Propiedades	Símbolo	Valor
Límite Líquido (%)	LL	39
Límite Plástico (%)	LP	23
Índice Plástico (%)	IP	16
Clasificación SUCS	-	CL
Clasificación AASHTO	-	A-6 (10)
Gravedad Específica (g/cm3)	Gs	2.410
Máxima densidad seca (g/cm3)	MDD	1.642
Óptimo contenido de humedad (%)	OMC	17.9

Nota: Fuente propia.

Los resultados del ensayo Proctor modificado evidencian que el suelo natural alcanza una densidad seca máxima (MDD) de 1.642 g/cm³ a un contenido óptimo de humedad (OMC) de 17.9%. La curva de compactación obtenida presenta el comportamiento típico de suelos finos, donde la densidad seca aumenta progresivamente con el contenido de humedad hasta

alcanzar un valor máximo, a partir del cual disminuye debido al exceso de agua en los vacíos. Estos parámetros representan la condición de compactación más eficiente del material y fueron adoptados como referencia para la preparación de las muestras estabilizadas con diferentes porcentajes de ESP.

En lo que corresponde a los límites de Atterberg, se registró una tendencia decreciente en los valores a medida que se añade el porcentaje de ESP en el suelo de acuerdo con lo representado en la Fig. 9. El límite líquido se redujo drásticamente de 39 % en la muestra natural a 29 %, mientras que el límite plástico presentó una ligera variación, pasando de 23 % a 21 %. En consecuencia, el índice de plasticidad disminuyó de 16 % a 8 %, reflejando una notoria mejora en la estabilidad y trabajabilidad del suelo.

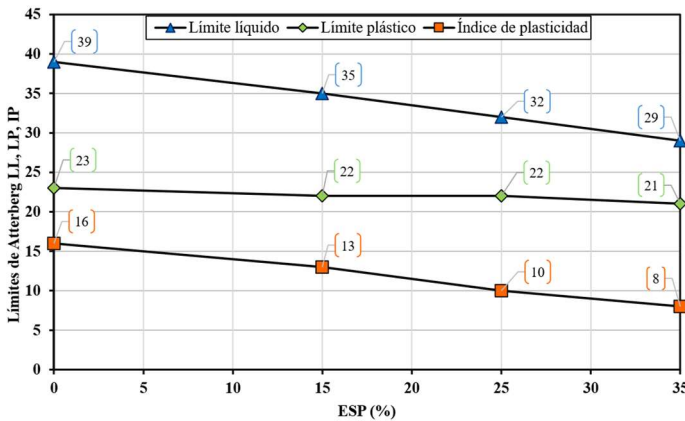


Fig. 9 Límites de Atterberg

B. Propiedades mecánicas

Los resultados de corte directo exponen que la cohesión del material arcilloso disminuye de forma clara y casi lineal conforme aumenta la proporción de ESP. En la muestra natural, la cohesión inicial fue de 25.2 kPa, mientras que con la incorporación del 35 % de ESP el valor descendió hasta 16.6 kPa, tal como se aprecia en la Fig. 10. Este resultado indica que, bajo las condiciones experimentales empleadas, el ESP no mejora la cohesión del suelo de Ate; por tanto, la evaluación completa de su eficacia como estabilizante sostenible requiere complementar el análisis con los cambios en la fricción, límites de Atterberg y la capacidad admisible para determinar si el efecto neto sobre la resistencia al corte y la capacidad portante es favorable.

Asimismo, el ensayo de corte directo refleja incremento sostenido del grado friccional interno al aumentar la proporción de ESP. El valor pasa de 5.8° en la muestra control a 12.1° con 35 % de adición de ESP, reflejando un aumento continuo en la resistencia friccional del suelo como se aprecia en la Fig. 11. Este incremento friccional compensa la pérdida de cohesión y genera un aumento neto de la resistencia al corte a los esfuerzos sometidos. Estos resultados cuantifican de manera verificable la mejora en el parámetro friccional y respaldan el potencial del polvo de cáscara de huevo como estabilizante alternativo y sostenible.

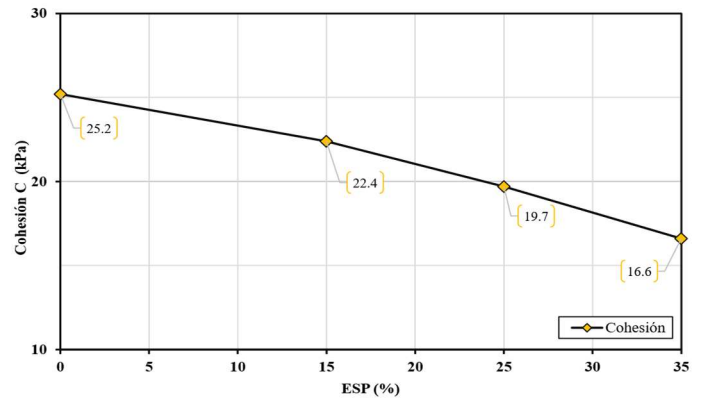


Fig. 10 Cohesión

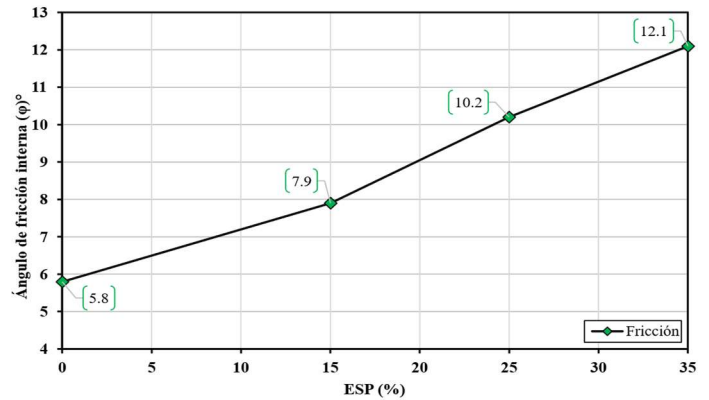


Fig. 11 Ángulo de fricción

Las capacidades admisibles obtenidas para las mezclas con distintos porcentajes de ESP fueron de 119.63 kPa para el suelo natural de 0 % de ESP, 127.78 kPa con 15 %, 139.62 kPa con 25 % y 146.30 kPa con 35 % respectivamente. Se observa en la Fig. 12 que la adición del 35 % de ESP generó el incremento más significativo respecto a la muestra control. La tendencia ascendente responde directamente a la mejora en los parámetros de resistencia al corte, principalmente al aumento del ángulo friccional interno observado en los ensayos previos, que contribuye de manera significativa a la capacidad portante.

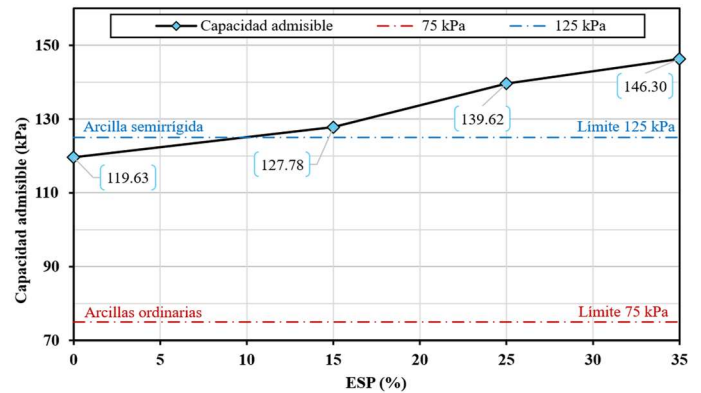


Fig. 12. Capacidad admisible

IV. DISCUSIÓN

El tratamiento con adición de ESP indujo notables cambios en los límites de Atterberg del suelo arcilloso. Se observó una reducción drástica en la plasticidad, pues el índice disminuyó de 16 % a 8 %, evidenciando mejorías importantes en la estabilidad y trabajabilidad del suelo arcilloso. Esta tendencia es compatible con los valores típicos de estos suelos, pues tienden a reducir su LL al aumentar el porcentaje de ESP como se refleja en los estudios [15-22]. Asimismo, el LP en esta investigación tiene una ligera variación de 2% tal cual corroboran las investigaciones [3], [16], [22]. Esta tendencia se debió principalmente a las actividades de intercambio catiónico facilitadas por los iones de calcio presentes en el CaCO_3 del ESP, que originan que las partículas pequeñas, como la arcilla, se agrupen creando flóculos debido a interacciones electrostáticas, como respaldan las investigaciones de autores [2], [21]. El efecto de intercambio iónico y floculación reduce la carga superficial de las arcillas y favorece la formación de agregados, lo que a su vez disminuye el LL y aumenta el LP, causando la caída del IP [1], [2]. En definitiva, el aditivo de CaCO_3 en el ESP contribuye a estabilizar la red de partículas arcillosas mediante floculación iónica Ca^{2+} , consistente con la tendencia reportada en otros estudios donde la adición de calcio produce una estructura de suelo menos plástica y más estable [2]. A pesar de los resultados favorables, es importante reconocer ciertas restricciones inherentes al estudio. La cantidad limitada de muestras 0 %, 15 %, 25 % y 35 % no permiten representar con total exactitud el comportamiento progresivo del material frente a variaciones menores en el contenido de ESP. En este sentido, se sugiere que futuras investigaciones amplíen el rango de dosificaciones analizadas.

En cuanto al análisis de los parámetros de resistencia al corte se mostró que la cohesión y el ángulo friccional interno variaron con el porcentaje de ESP añadido de forma no lineal. El comportamiento de estos parámetros fue inversamente proporcional pues mientras la cohesión se reducía el ángulo friccional siguió aumentando. Este comportamiento sugiere que, en un primer momento, que el CaCO_3 del ESP reacciona con los minerales arcillosos y el agua, formando compuestos cementantes que incrementan temporalmente la unión entre partículas. No obstante, cuando la cantidad de aditivo supera cierto umbral, estos enlaces se vuelven frágiles y la estructura del suelo pierde consistencia, provocando una reducción progresiva de la cohesión. Se pueden atribuir las alteraciones en la estructura del suelo a nivel microestructural para explicar la disminución de la cohesión cuando se incrementa el contenido de ESP. Aunque el CaCO_3 promueve la floculación de partículas arcillosas en un principio, a dosis más altas el ESP funciona como un material fino no cohesivo que interrumpe la matriz de las partículas arcillosas. Esto produce una transición hacia un comportamiento más friccional que cohesivo, lo cual explica el descenso gradual de la cohesión que se aprecia en los resultados. Diversos autores sostienen que esta caída suele manifestarse a partir de contenidos entre 6 % y 10 % de ESP [2], [13] respectivamente; sin embargo, otros estudios reportan

que dicho descenso puede extenderse hasta alrededor del 18 % y 20% de ESP [16]. En comparación, a los valores obtenidos en el presente ensayo confirman una disminución continua después de ese rango, lo que indica que el suelo analizado presenta una sensibilidad mayor a la dosificación del estabilizante. Por otro lado, el incremento sostenido del ángulo de fricción interno se asocia a la acción del carbonato de calcio presente en el ESP, el cual propicia la formación de microestructuras cementantes que mejoran el contacto entre partículas y generan texturas más angulosas y rugosas [1]. El incremento más notable entre 25 % y 35 % indica que, en este rango, el material adquiere una estructura más densa y estable, lo que refuerza su capacidad de resistencia al corte. Al comparar estos resultados con investigaciones previas, se confirma la tendencia. Pues, la referencia [17] reportó un aumento del ángulo de fricción interna de 18° a 24° al incorporar hasta 5 % ESP. Asimismo, la referencia [2] registró un incremento hasta 19.4° con 6 % de adición; Asimismo, las referencias [13] y [18], señalaron un aumento progresivo del ángulo de fricción con valores de convergencia entre 8 a 10 % y 5 %, respectivamente. Sin embargo, en el presente estudio la fricción continúa incrementándose incluso hasta el 35 % de ESP, lo que sugiere que el tipo de suelo utilizado posee una composición más fina y cohesiva, lo cual amplifica la acción friccional del ESP. Este comportamiento indica una prolongación del efecto estabilizador más allá de los límites comúnmente reportados, posiblemente debido a una mejor redistribución de partículas y a la mayor densificación generada por la presencia del carbonato de calcio.

Desde un punto de vista fisicoquímico, la interacción entre las partículas de arcilla y el CaCO_3 presente en el ESP se asocia principalmente a procesos de intercambio catiónico y modificación de la estructura del suelo. Los iones calcio (Ca^{2+}) liberados favorecen la reducción del espesor de la doble capa difusa en las partículas arcillosas, promoviendo la floculación y aglomeración de las mismas. Este cambio induce una transición de una estructura dispersa a una más estable y granular, lo que incrementa la fricción interna del suelo. Sin embargo, a mayores contenidos de ESP, el material comienza a comportarse como un relleno fino de carácter no cohesivo, interrumpiendo la matriz arcillosa y reduciendo las fuerzas de atracción entre partículas, lo que explica la disminución de la cohesión observada. En conjunto, estos mecanismos justifican el comportamiento geotécnico obtenido, caracterizado por una reducción de la cohesión y un incremento del ángulo de fricción interna.

Finalmente, la capacidad admisible mostró una tendencia incremental estable con la dosificación de ESP. Los valores obtenidos con 15%, 25% y 35% superaron al valor del suelo original. La referencia [32] muestra valores de capacidad admisible para suelos arcillosos desde blandos hasta duros que comprenden alrededor de 25 y 300 kPa respectivamente. De este modo, los valores obtenidos en el estudio con la adición de ESP a partir del 15% se sitúan hacia el límite superior del rango de 125 kPa. En consecuencia, puede inferirse que la

incorporación progresiva del ESP contribuye a una mejora moderada de la rigidez y comportamiento portante del suelo, ya que se logra sobrepasar el umbral de 125 kPa que considera al suelo como una arcilla semirrígida [33], [5]. Esto es consistente con lo esperado pues la disminución de plasticidad y la formación de estructuras cementantes densas elevan la rigidez del suelo, aumentando su resistencia al asentamiento bajo carga. Se observa que los valores obtenidos para las dosificaciones del 25 % y 35 % tienden a estabilizarse, mostrando una pendiente casi horizontal. Este comportamiento sugiere que el material estaría alcanzando un límite de mejora en su capacidad admisible. Por ello, se recomienda que estudios posteriores incluyan porcentajes intermedios o superiores de adición de ESP, con el fin de determinar de manera más precisa el punto crítico o porcentaje óptimo en el cual se maximiza la resistencia del suelo sin afectar su comportamiento estructural. Del mismo modo, incorporar ensayos triaxiales consolidados, los cuales permitirían evaluar con mayor detalle la resistencia, la durabilidad y el desempeño del material frente esfuerzos aplicados.

V. CONCLUSIÓN

La incorporación de ESP en suelos arcillosos de Ate demostró ser eficaz como estabilizante alternativo y sostenible para cimentaciones superficiales. En particular, los índices físicos del suelo evidenciados en los límites de Atterberg se modificaron favorablemente; así, el índice de plástico se redujo significativamente de 16% a 8%, reflejando menor plasticidad y potencial retracción.

Respecto a los parámetros de resistencia al corte, aunque la cohesión disminuyó de 25,2 a 16,6kPa, el ángulo de fricción interno prácticamente se duplicó de 5,8° a 12,1°, evidenciando un desempeño favorable neto en la resistencia mecánica del suelo. Con respecto a la capacidad admisible se incrementó de 119,63kPa a 146,30kPa al agregar ESP, confirmando su efecto positivo en la capacidad de carga de cimentaciones superficiales. El análisis comparativo de las diferentes dosificaciones de ESP reveló que, a medida que aumenta el contenido del aditivo, se logra una mayor reducción de plasticidad y un mayor aumento en el ángulo de fricción interna, aunque los beneficios marginales tienden a estabilizarse en niveles elevados. De este modo, se identifica que una dosificación cercana al 35% de ESP ofrece un balance óptimo entre la disminución de plasticidad, resistencia al corte y capacidad portante.

Esta investigación contribuye significativamente al conocimiento existente al abordar un vacío poco explorado en la literatura, al evaluar la aplicación del ESP no solo en estabilización de proyectos viales, sino también en cimentaciones superficiales, utilizando dosificaciones superiores al 20%, un rango que no ha sido suficientemente considerado en estudios previos, lo cual reafirma su potencial como material estabilizante sostenible. No obstante, se recomienda profundizar en análisis microestructurales SEM, XRD y ensayos triaxiales consolidados para determinar la

durabilidad y el comportamiento del material bajo condiciones de carga y humedad variables, de modo que se consolide su aplicación práctica en proyectos de ingeniería civil sostenible.

REFERENCIAS

- [1] M. Mehmood, Y. Guo, Y. Liu, L. Wang, W. Nie, B. U. Uge, S. Ali, C. Xuanyu, and Y. Zhao, "Experimental study on the engineering characteristics of expansive soil improved conjointly using enzyme induced carbonate precipitation and eggshell powder," *Soils and Foundations*, vol. 65, no. 1, p. 101567, 2025, doi: 10.1016/j.sandf.2025.101567
- [2] M. Sakr, A. Nazir, W. Azzam, and N. Osama, "Soft clay improvement using eggshell powder as a sustainable material," *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 18, Dec. 2023, doi: 10.1080/19386362.2023.2295684
- [3] P. Kulanthaivel, S. Gokulakannan, and S. Vinodhkumar, "Eco-friendly soil stabilization: a combined approach using lime and waste eggshell powder," *Global NEST Journal*, pp. 120–130, 2023, doi: 10.30955/gnj.005077
- [4] S. Selvakumar, S. Balu, and P. Kulanthaivel, "Model tests on swelling behavior of an expansive soil with recycled geofom granules column inclusion," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 15, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1007/s12517-022-09427-2
- [5] Universidad Nacional de Ingeniería, Microzonificación Sísmica del Distrito de Ate, Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID-FIC-UNI), Lima, Perú, Sep. 2014.
- [6] Ministerio del Ambiente del Perú, "Perú: valorización de residuos orgánicos contribuye a la reducción de aproximadamente 25 000 toneladas de gases de efecto invernadero," Gob.pe, Fecha de publicación. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/906410-peru-valorizacion-de-residuos-organicos-contribuye-a-la-reduccion-de-aproximadamente-25-000-toneladas-de-gases-de-efecto-invernadero>
- [7] M. A. Mohammed, N. Z. Mohd Yunus, M. A. Hezmi, D. Z. Abang Hasbollah, and A. S. A. Rashid, "Ground improvement and its role in carbon dioxide reduction: a review," *Environmental Science and Pollution Research International*, vol. 28, no. 8, pp. 8968–8988, Feb. 2021, doi: 10.1007/s11356-021-12392-0
- [8] Y. V. Noriega Armas, J. A. Vives Arroyo, and S. P. Muñoz Pérez, "Uso de estabilizadores de suelo: una revisión del impacto al corte y asentamiento," *Avances*, vol. 19, no. 1, pp. 1–15, 2022. doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.6856.
- [9] H. Z. C. Alattafi, H. Yaacob, N. H. M. Kamaruddin, Z. H. Al-Saffar, and R. P. Jaya, "Effects of nano eggshell powder as a sustainable bio-filler on the physical, rheological, and microstructure properties of bitumen," *Results in Engineering*, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102061.
- [10] N. Pompilla Caceres, M. Gonzales Iquira, P. Tanco Fernandez, and I. Acosta Gonzales, "Obtención de citrato de calcio a partir de cáscaras de huevo de gallina y su aprovechamiento como suplemento vitamínico," *Industrial Data*, vol. 28, no. 1, pp. 35–59, Jul. 2025, doi: 10.15381/idata.v28i1.28326.
- [11] S. Owuamanam and D. Cree, "Progress of bio-calcium carbonate waste eggshell and seashell fillers in polymer composites: a review," *Journal of Composites Science*, vol. 4, no. 2, p. 70, Jun. 2020, doi: 10.3390/jcs4020070.
- [12] M. Mehmood, Y. Guo, Y. Liu, L. Wang, W. Nie, B. U. Uge, S. Ali, C. Xuanyu, and Y. Zhao, "Experimental study on the engineering characteristics of expansive soil improved conjointly using enzyme induced carbonate precipitation and eggshell powder," *Soils and Foundations*, vol. 65, p. 101567, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.sandf.2025.101567.
- [13] H. Bekhouche, O. Bahloul, F. Z. Tebbi, and A. Aidoud, "Modification of the geotechnical properties of loess using eggshell waste (El'Mghair Region)," *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, vol. 19, pp. 489–496, 2024, doi: 10.18280/ij dne.190214.
- [14] O. Zaid, S. R. Z. Hashmi, M. H. El Ouni, R. Martínez-García, J. de Prado-Gil, and S. E. A. S. Yousef, "Experimental and analytical study of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete modified with eggshell powder

- and nano-silica,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 7162–7188, May 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.04.240.
- [15] S. M. Abdulrahman, A. S. A. Gharbawi, and A. A. Al-Sultan, “Effect of engineering properties of soft clay soils stabilized with limestone, eggshell powder, and eggshell ash,” *Water and Environmental Sustainability*, vol. 3, no. 2, pp. 68–75, 2023, doi: 10.52293/WES.3.2.6875.
- [16] B. Uprety, B. Uprety, and A. Panta, “Influence of egg shell powder, bagasse ash and lime on stability of soil,” *Journal of Lumbini Engineering College*, vol. 5, pp. 67–74, 2023, doi: 10.3126/lecj.v5i1.60127.
- [17] U. Zada, A. Jamal, M. Iqbal, S. M. Eldin, M. Almoshaogeh, S. R. Bekkouché, and S. Almuaythir, “Recent advances in expansive soil stabilization using admixtures: current challenges and opportunities,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, p. e01985, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e01985.
- [18] D. Willis, E. Hartono, W. E. Pratama, and W. I. Wardani, “Shear strength characteristic of geopolymer fly ash and egg shell powder stabilized clay soil,” *E3S Web of Conferences*, vol. 429, p. 04024, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202342904024.
- [19] K. Harish, C. S. Reddy, A. Yuvaraju, P. Prabhudeva, K. Hemalatha, V. Bramham, and P. Srinivas, “A study on stabilization of soils by using egg shell powder,” *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)*, vol. 10, no. 2, Apr. 2023, ISSN 2350-0557. doi: 10.55524/ijirem.2023.10.2.17.
- [20] E. Mina, W. Fathonah, A. D. Vindo, and R. I. Kusuma, “Soil stabilization using eggshell powder and its effect on unconfined compressive strength (UCS) values,” *Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 20, no. 1, p. 17, Jun. 2024, doi: 10.62870/tjst.v20i1.22565.
- [21] B. Yang, Z. Yin, A. Hasheminezhad, M. A. Alsheyab, H. Ceylan, and S. Kim, “Enhancing soil engineering properties with eggshell powder: a laboratory-based approach to sustainable road construction,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 505, p. 145464, 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.145464.
- [22] J. Ndagijima, K. Kim, S. Kim, and J. Shin, “Stabilization of lateritic soil with eggshell powder,” *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, vol. 23, no. 1, pp. 5–13, Jan. 2022, doi: 10.14481/jkges.2022.23.1.5.
- [23] M. T. de Araujo, S. T. Ferrazzo, G. Bruschi, and N. C. Consoli, “Mechanical and environmental performance of eggshell lime for expansive soils improvement,” *Transportation Geotechnics*, vol. 31, p. 100681, 2021, doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100681.
- [24] D. Macías García and E. Ortiz Hernández, “Estudio del carbonato de calcio como agente estabilizador de subrasante,” *Polo del Conocimiento*, vol. 7, no. 7, pp. 2302–2315, 2022, doi: 10.23857/pc.v7i7.4346.
- [25] R. Aquisé Ramos and J. Reynoso Oscanoa, “Incorporación de ceniza de cáscara de huevo en la estabilización de subrasante arcillosa en Apurímac, Perú,” *Gaceta Técnica*, vol. 26, no. 2, pp. 64–80, Sep. 2025, doi: 10.51372/gacetatecnica262.6.
- [26] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), *Norma Técnica E.050: Suelos y Cimentaciones, Reglamento Nacional de Edificaciones*, Lima, Perú: MVCS, 2018.
- [27] ASTM D420-18, *Standard Guide for Site Characterization for Engineering, Design, and Construction Purposes*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.
- [28] ASTM D422-63(2007) e2, *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007.
- [29] ASTM D4318-17, *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- [30] ASTM D558-11, *Standard Test Methods for Moisture-Density (Unit Weight) Relations of Soil-Cement Mixtures*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.
- [31] ASTM D3080/D3080M-11, *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.
- [32] J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1996.
- [33] P. K. Robertson y K. L. Cabal, *Guide to Cone Penetration Testing for Geo-Environmental Engineering*, 2.^a ed., Signal Hill, CA, USA: Gregg Drilling & Testing Inc., Sep. 2010.
- [34] ASTM D2487-17, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, West Conshohocken, PA, USA, 2017.