

Impacto del tereftalato de polietileno triturado en las propiedades mecánicas de un suelo arenoso, Sector Pachacútec, Ventanilla, Callao, 2025

Impact of crushed polyethylene terephthalate on the mechanical properties of a sandy soil, Pachacutec Sector, Ventanilla, Callao, 2025

André Sebastian Arrieta Lindo¹; Paolo Ricardo Trebejo Sipion²; Russell Nazario Ticse³ Aristoteles Gerardo Figueroa Lezano⁴

^{1,2,3,4} Universidad Tecnológica del Perú, UTP, Perú, U20221316@utp.edu.pe, U20228467@utp.edu.pe, c27457@utp.edu.pe, C23382@utp.edu.pe

Abstract– This research focuses on analyzing the impact of the inclusion of shredded polyethylene terephthalate (PET) on the mechanical properties of a sandy soil, specifically in the Oasis 1st Sector Pachacutec Human Settlement, located in Ventanilla, Callao. It was necessary to carry out laboratory tests following the guidelines of RNE-E.050 to evaluate the changes in the friction angle and bearing capacity of the soil; in addition, to obtain an optimum dosage of PET - sandy soil. The experiments involved the addition of different proportions of shredded PET to the sandy soil, specifically 2%, 4% and 6%, and direct shear tests were carried out under two loading conditions to obtain the friction angle and subsequently the bearing capacity. In addition, Proctor tests were carried out to determine the optimum moisture content and maximum dry density of the PET - sandy soil dosage that optimizes the mechanical properties of the standard soil. Preliminary results suggest that the addition of shredded PET could significantly improve the bearing capacity of the soil, which would indicate its viability as a stabilizing material in the study area; however, the proportion of PET - sandy soil varies according to the study region. .

Keywords-- Sandy soils, polyethylene terephthalate, shredded PET, soil reinforcement, bearing capacity and friction angle.

Impacto del tereftalato de polietileno triturado en las propiedades mecánicas de un suelo arenoso, Sector Pachacútec, Ventanilla, Callao, 2025

André Sebastian Arrieta Lindo¹; Paolo Ricardo Trebejo Sipion²; Russell Nazario Ticse³ Aristoteles Gerardo Figueroa Lezano⁴

^{1,2,3,4} Universidad Tecnológica del Perú, UTP, Perú, U20221316@utp.edu.pe, U20228467@utp.edu.pe, c27457@utp.edu.pe, C23382@utp.edu.pe

Resumen– Esta investigación se centra en analizar el impacto de la inclusión de tereftalato de polietileno (PET) triturado en las propiedades mecánicas de un suelo arenoso, específicamente en el Asentamiento Humano Oasis 1er Sector Pachacutec, ubicado en Ventanilla, Callao. Fue necesario realizar ensayos de laboratorio siguiendo los lineamientos de la RNE-E.050 para evaluar los cambios en el ángulo de fricción y la capacidad portante del suelo; además, para obtener una dosificación óptima de PET - suelo arenoso. Los experimentos involucraron la adición de diferentes proporciones de PET triturado al suelo arenoso, específicamente 2%, 4% y 6%, y se realizaron ensayos de corte directo bajo dos condiciones de carga para obtener el ángulo de fricción y posteriormente la capacidad portante. Además, se realizaron ensayos Proctor para determinar el contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima de la dosificación de PET - suelo arenoso que optimiza las propiedades mecánicas del suelo estándar. Los resultados preliminares sugieren que la adición de PET triturado podría mejorar significativamente la capacidad portante del suelo, lo que indicaría su viabilidad como material estabilizador en el área de estudio; sin embargo, la proporción de PET – suelo arenoso varía según la región de estudio.

Palabras clave-- Suelos arenosos, tereftalato de polietileno, PET triturado, refuerzo de suelos, capacidad portante y ángulo de fricción.

I. INTRODUCCIÓN

Los suelos del distrito de Ventanilla se caracterizan por su alto contenido de partículas de arena en sus estratos; asimismo, la composición granulométrica de suelos con notable proporción de arena confiere una capacidad de soporte o capacidad portante limitada al suelo, lo cual puede comprometer la estabilidad de las estructuras construidas sobre ellos [1]. La presencia predominante de partículas de arena reduce la cohesión entre las partículas del suelo, incrementando el riesgo de fallas por corte, o en su defecto, asentamientos diferenciales en las edificaciones [2]; asimismo, la susceptibilidad a la erosión de los suelos arenosos pone en riesgo la integridad de las edificaciones [3]. Sin embargo, existe una alternativa viable para mejorar significativamente la calidad de estos suelos arenosos. La incorporación del Tereftalato de Polietileno (PET) triturado al suelo, puede aumentar de manera sustancial su desempeño geotécnico. El

PET actúa como un refuerzo distribuido dentro de la matriz del suelo, mejorando su cohesión interna y resistencia al corte [4]. Como consecuencia, se logra un aumento considerable en la capacidad portante del suelo, y con ello, una mayor estabilidad de las estructuras cimentadas sobre este tipo de terreno mejorado.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo General

- Evaluar el impacto del tereftalato de polietileno triturado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de un suelo arenoso acorde al RNE-E.050, en el AA.HH. Oasis 1er Sector Pachacútec, Ventanilla, Callao.

B. Objetivos Específicos

- Analizar el ángulo de fricción de la muestra estándar del suelo arenoso y la muestra del suelo arenoso con adición de tereftalato de polietileno triturado.
- Comparar la capacidad portante de la muestra estándar del suelo arenoso y la muestra del suelo arenoso con adición de tereftalato de polietileno triturado.
- Proponer una dosificación óptima de tereftalato de polietileno triturado en el suelo arenoso.

III. ESTADO DEL ARTE

En ingeniería geotécnica, mejorar las propiedades mecánicas de los suelos es esencial para la estabilidad de las estructuras. En este contexto, el tereftalato de polietileno reciclado (PET) se presenta como una alternativa sostenible para mejorar las características de los suelos. Esta revisión evalúa el impacto del PET triturado en la resistencia y comportamiento del suelo arenoso, además de examinar estudios previos que destacan su relevancia en la mejora de la ingeniería geotécnica y en la promoción de prácticas

constructivas sostenibles. El PET se presenta en diversas formas, cada una con características específicas: en tiras, mejora el valor de CBR, la resistencia máxima y la resistencia a la extracción, aunque reduce la rigidez secante y el drenaje [5] y [6]. En forma de fibra, incrementa la resistencia al corte, el valor de CBR, el índice de plasticidad, la cohesión y el ángulo de fricción interna, mejorando la capacidad de carga y disminuyendo el asentamiento [5] y [7]. En forma granular o triturado, aumenta la permeabilidad y el ángulo de fricción, pero reduce la resistencia al corte y cohesión del suelo [8]. La elección de la presentación de PET dependerá de los requisitos específicos del proyecto, del proceso constructivo planteado y de la facilidad de obtención de este.

Según [9], las pruebas triaxiales muestran que la incorporación de fibras de PET incrementa significativamente la resistencia y rigidez del suelo arenoso, reduciendo su deformación; las fibras de mayor tamaño son más efectivas al entrelazarse con los granos de arena, mejorando la cohesión y estabilidad del suelo. Además, [10] demostró que los residuos de PET estabilizan suelos arenosos, mejorando sus propiedades mecánicas a través de pruebas de corte directo, Proctor y CBR. Igualmente, [11] indicó que las fibras de PET incrementan la fuerza de cohesión y el ángulo de fricción interna, lo que sugiere una mejora en la capacidad portante y una notable reducción en el asentamiento del suelo. El estudio realizado por [12] destaca el uso de PET reciclado como refuerzo de suelos arenosos, considerándolo una innovación con gran potencial en ingeniería civil y una solución eficaz para optimizar las propiedades del suelo para cimentaciones. Según [13], las cualidades únicas del PET, como su alta resistencia a la tracción y durabilidad, lo convierten en un excelente material para estabilizar suelos arenosos, mejorando significativamente su capacidad de carga y resistencia a la erosión.

La licuefacción en suelos arenosos provoca que las fuerzas de cohesión a nivel molecular se rompan y el estrato presente actúe similar a un líquido; por ello, [14] y [15] mediante ensayos de laboratorio demuestran que, el uso de refuerzos adicionales como las fibras PET, han evidenciado ser efectivos en aumentar la resistencia a la licuefacción del suelo arenoso. Este material mejora la interacción y la superficie de contacto con los granos de arena, lo que retrasa el desarrollo de la presión de poro excesiva y disminuye la presión de poros de agua al ocurrir la dilatación en el suelo reforzado.

Según los trabajos de [6], [10], [13], [16], y [17] detallaron que, la relación óptima de PET respecto al peso seco del suelo está entre 0.4% y 2%, mejorando significativamente las propiedades mecánicas del suelo arenoso en este rango. La adición de PET refuerza la matriz del suelo, incrementando su resistencia a la compresión, tracción y corte al absorber y transferir eficientemente los esfuerzos aplicados. Esto mejora la ductilidad y la capacidad de carga del sistema suelo-PET, así como su respuesta ante solicitaciones cíclicas, aumentando la resistencia a la fatiga y

reduciendo la deformación permanente. Adicional a ello, [18] desde una postura contraria indica que, se presentaron aumentos de las propiedades mecánicas al adicionar 15% de PET a la muestra a ensayar.

En la investigación de [19], relacionado a carreteras, señala que, la incorporación de pequeñas cantidades de PET aumenta la densidad seca máxima en suelos para carreteras, mientras que porcentajes superiores al 4% reducen tanto el contenido óptimo de humedad como la densidad seca máxima. En línea con esto, el estudio de [20] determina que el porcentaje óptimo de PET para mejorar el suelo es de 0.3%, logrando una mejora del 46%.

El aprovechamiento de recursos existentes y la reducción de residuos son esenciales para la sostenibilidad ambiental en proyectos de construcción. El uso de material reciclado, como el PET de botellas plásticas, se presenta como una alternativa rentable para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos [13] y [17]. Incorporar materiales reciclados disminuye la necesidad de extraer recursos vírgenes, reduciendo significativamente el impacto ambiental. Esta práctica de reutilización ayuda a preservar los recursos naturales y a minimizar la huella de carbono en la construcción. Además, el uso de PET en el reforzamiento de suelos arenosos contribuye a disminuir los residuos plásticos [18], promoviendo así prácticas ecológicas en el sector.

Según [21], en Austria y otros países enfrentan desafíos significativos en el reciclaje de envases de plástico postconsumo, ya que los residuos y la suciedad disminuyen su valor reciclable, siendo el PET el material más contaminante. Asimismo, [22] señala que el PET es un polímero común en la industria del envasado cuya producción masiva ha originado una grave crisis ambiental. Por ello, se han intensificado esfuerzos en Europa para mejorar el reciclaje de PET y mitigar su impacto ambiental. [23] denota una preocupación futura respecto al uso de

PET en el reforzamiento de suelos arenosos. Uno de los principales problemas es que este puede liberar productos químicos tóxicos a medida que se descompone, lo que puede afectar la calidad del sustrato terrestre y del agua subterránea.

La implementación de PET en el reforzamiento de suelos arenosos ofrece beneficios económicos significativos. Este material reciclado es de bajo costo y fácil manejo debido a su ligereza [16]. Del mismo modo, [24] su uso reduce considerablemente el tiempo y los costos de construcción; además, [17] y [18] al integrar PET, se mejora la estabilidad y resistencia del suelo, permitiendo dimensiones menores en estructuras de contención y cimentación.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Reglamento Nacional de Edificaciones – E.050

La norma E.050 establece los parámetros para el diseño y construcción de cimentaciones en edificaciones, garantizando la integridad y estabilidad de las estructuras. Incluye ensayos in situ y de laboratorio, métodos de mejoramiento del suelo, análisis de cargas, asentamiento tolerable, factor de seguridad y presión admisible, asegurando que los suelos soporten adecuadamente las cargas [25].

B. Suelo arenoso

1) Composición y estructura

Los suelos arenosos tienen más del 70% de arena en su primera capa de un metro y menos del 15% de arcilla. Según [26], en la NTP 339.150, están formados por pequeñas partículas de rocas y minerales que los hacen sueltos y porosos, facilitando la circulación de aire y agua. Su alta permeabilidad les permite secarse rápidamente tras las lluvias. Estos suelos pueden formarse de tres maneras: como arenas residuales de rocas ricas en cuarzo, arenas eólicas en climas cálidos y secos, y arenas aluviales transportadas por agua, que son menos erosionadas.

2) Clasificación del suelo arenoso

De acuerdo con la NTP 339.134, los suelos con mayor proporción de arena se clasifican en la categoría de arenas (S) dentro del sistema SUCS. Estas se subdividen en arenas bien graduadas (SW), con partículas de diferentes tamaños que ofrecen alta permeabilidad; arenas mal graduadas (SP), compuestas principalmente por partículas de tamaño similar, lo que les da baja permeabilidad; y arenas limosas (SM), que son mezclas de arena y limo, presentando propiedades intermedias entre arenas y suelos finos [27].

3) Propiedades mecánicas de los suelos

a) Ángulo de fricción interna

Según lo indicado en la NTP 339.171, la fricción interna en arenas depende de su tamaño de partícula, forma y textura, con valores angulares que oscilan entre 30 y 45 grados. En ingeniería, se consideran valores entre 35 y 42 grados para garantizar la resistencia al corte y la estabilidad de taludes y cimentaciones [28].

b) Capacidad portante del suelo

Según la NTP 339.153, los suelos arenosos ofrecen una alta capacidad portante, superior a la de los suelos arcillosos o

limosos, debido a su mayor resistencia a la compresión y fricción interna [29].

4) Fallas en suelos arenosos

a) Asentamiento

A medida que una carga actúa sobre el suelo arenoso, se produce una reorganización interna de sus partículas, lo que conlleva una reducción en su volumen [30], este cambio volumétrico, a su vez, provoca un movimiento descendente de la superficie. Por ello, el asentamiento es un fenómeno gradual que ocurre cuando el suelo se somete a cargas externas y el agua intersticial es expulsada [31].

b) Deslizamiento

Los deslizamientos ocurren cuando la resistencia al corte del suelo es superada por las fuerzas gravitacionales, especialmente en pendientes pronunciadas [32]. En los suelos arenosos, la saturación de este y la falta de cohesión entre las partículas son factores que contribuyen a este tipo de falla.

c) Erosión

La erosión en suelos es el proceso de desgaste y transporte de partículas del suelo por agentes como el agua y el viento [33]. Los suelos arenosos son particularmente susceptibles a la erosión debido a su baja cohesión y capacidad de retención de agua.

d) Licuefacción

La licuefacción es un fenómeno en el cual un suelo arenoso saturado pierde su rigidez y se comporta como un líquido bajo la acción de cargas sísmicas. Los suelos arenosos son propensos a sufrir fenómenos de licuefacción desarrollados en gran manera por las alteraciones sísmicas [34].

C. Tereftalato de polietileno (PET)

1) Composición y estructura de los PET

Según Botero (2014), el PET está compuesto por ácido tereftálico y etilenglicol, en proporciones de aproximadamente 60-70% de tereftalato y 30-40% de etilenglicol [35]. Su estructura está formada por cadenas lineales de polímero con unidades repetitivas de tereftalato y etilenglicol, lo que le confiere propiedades mecánicas y térmicas excelentes. Se utiliza principalmente en envases, botellas y fibras textiles.

2) Propiedades mecánicas del PET

El PET tiene una resistencia a la tracción de aproximadamente 55-75 MPa, un módulo de elasticidad relativamente alto, en el rango de 2,000 a 3,000 MPa, una

resistencia al impacto de 1-2 kJ/m² y exhibe una deformación a la rotura entre 10% a 20%. Además, presenta una temperatura de deformación bajo carga de alrededor de 70-80°C y una temperatura de reblandecimiento de aproximadamente 70-80°C. Estas propiedades mecánicas hacen que el PET sea un material con buena resistencia y durabilidad [35].

3) Propiedades químicas

El PET destaca por su resistencia a ataques químicos gracias a la composición de sus monómeros y su estructura interna, soportando sustancias como hidrocarburos, alcoholes y ácidos en concentraciones moderadas; no obstante, presenta solubilidad en ciertos solventes orgánicos, disolviéndose en soluciones aromáticas, halogenadas, cloroformo, tricloroetileno y cetonas [36]. A pesar de sufrir desgaste por condiciones ambientales, el PET enterrado preserva su funcionalidad por más tiempo, en comparación del PET expuesto [37].

4) Toxicidad del PET

El PET cumple con ciertos límites de migración para sustancias específicas (SML) en contacto con alimentos y bebidas [38]. El SML de antimonio está establecida en 40 µg/kg para sólidos y 5 µg/L para agua potable. Para el acetaldehído, el SML es de 6 mg/kg, mientras que el formaldehído tiene un SML de 15 mg/kg [39].

5) Reciclaje del PET

Según [40], el reciclaje del PET es fundamental para reducir la contaminación y fomentar la sostenibilidad. Este proceso comienza con la recolección de envases usados, que se clasifican, trituran y lavan en plantas de reciclaje. Al reciclar PET, se disminuye la cantidad de plástico en vertederos y se ahorran recursos naturales y energía.

6) Aplicaciones del PET triturado en la ingeniería geotécnica

El PET triturado se utiliza en ingeniería geotécnica para reforzar suelos y mejorar su estabilidad. Se emplean en obras de construcción, como muros de contención, taludes, rellenos y control de erosión. También se utilizan en aplicaciones de drenaje para incrementar la resistencia y durabilidad de las estructuras geotécnicas [35].

D. Ensayo de mecánica de suelos

1) Ensayo de granulometría

Según lo indicado por NTP 339.128, el ensayo permite conocer la distribución de tamaños y cantidad de partículas en

un suelo, lo cual es importante para determinar su capacidad de drenaje y compacidad [41].

2) Ensayo de corte directo

De acuerdo con la NTP 339.171, el ensayo permite determinar la resistencia al corte de los suelos mediante la aplicación de una carga normal y una carga cortante en una muestra de suelo. Asimismo, nos brinda la cohesión y ángulo de fricción, lo que es fundamental para diseñar cimentaciones y estructuras de contención [28].

3) Ensayo de compactación Proctor

Basándose en lo dispuesto en la NTP 339.141, el ensayo permite determinar la densidad máxima que se puede lograr en un suelo y su contenido óptimo de humedad para una compactación adecuada [42].

V. HIPÓTESIS

La adición del tereftalato de polietileno triturado al suelo arenoso podría tener un impacto positivo en las propiedades mecánicas del suelo, mejorando su ángulo de fricción, y con ello la capacidad portante.

VI. METODOLOGÍA

A. Calicatas

Según [40], el reciclaje del PET es fundamental para reducir la contaminación y fomentar la sostenibilidad. Este proceso comienza con la recolección de envases usados, que se clasifican, trituran y lavan en plantas de reciclaje. Al reciclar PET, se disminuye la cantidad de plástico en vertederos y se ahorran recursos naturales y energía

1) Delimitación y excavación de calicatas

Se marcan las zonas para las calicatas (C-01, C-02, C-03) con cal viva, asegurando dimensiones de 1 metro por un 1 metro. Luego, se excavan las calicatas hasta 1.80 m de profundidad, verificando regularmente con cinta métrica para evitar riesgos de derrumbe.

2) Rotulación de las muestras

Se extraen muestras de 40 kg de cada calicata a 1.80 metros, almacenándolas en sacos blancos rotulados según el nombre de cada calicata. A continuación, se presentarán todos los ensayos de laboratorio realizados en el laboratorio de la Universidad Tecnológica del Perú – Sede Lima Norte, ubicada en la Av. Alfredo Mendiola 6377, Los Olivos.

B. Ensayo granulométrico

1) Secado de la muestra natural

De acuerdo con la NTP 339.128, [41], se seca la muestra al aire libre durante 24 horas o en horno a 110 ± 5 °C por 30

minutos hasta eliminar la humedad. En este sentido, se dejaron las muestras de las calicatas C-01, C-02 y C-03 durante un periodo de 30 minutos.

2) Pesado de las muestras

Se toman 1000 g de las muestras secas de las calicatas C-01, C-02 y C-03.

3) Vertido de la muestra a los tamices

Se vierte la muestra en una torre de tamices con mallas de 3/8", No. 4, No. 10, No. 20, No. 40, No. 60, No. 140, No. 200 y fondo acorde a [41].

4) Agitador de tamices

Se llevó a cabo el agitado mecánico durante el tiempo establecido de 5 a 10 minutos.

5) Pesado de las masas retenidas

Se pesan y registran cuidadosamente las cantidades de material retenido en cada tamiz.

C. Ensayo de contenido de humedad natural

1) Pesado de recipientes y muestras

Se pesan y taran los recipientes vacíos, luego se añaden 100g de muestra húmeda de la calicata C-01, C-02 y C-03.

2) Secado de la muestra

Las muestras se colocan en un horno a una temperatura de 110 ± 5 °C y se dejan secar durante 24 horas, permitiendo la eliminación de la humedad en las muestras.

3) Pesado de la muestra seca

Se pesan las muestras secas en los recipientes para obtener el peso final.

D. Ensayo corte directo

1) Preparación del PET triturado

Se tamiza el PET a través de malla N°10 y se retiene en la N°40, clasificando fracciones de 0.42 mm a 2.0 mm.

2) Preparación de la muestra

Se mide el molde tallador (capacidad de 138.30 g) y se compacta la muestra alterada en tres niveles, utilizando un escarificador para uniformidad.

6%	8.30 g	129.70 g
----	--------	----------

3) Montaje de la caja de corte

Se ensambla la caja comenzando con la base, se inserta una piedra porosa y un papel filtro, se coloca la muestra y se desmolda con pisón, se cubre con otro papel filtro y piedra porosa, y se asegura con la base ranurada y los pernos.

4) Ensayo de corte directo

Se retiran los pernos y se aplica fuerza cortante según los parámetros del suelo, con longitud máxima de corte de 25 mm y velocidad de 0.5 mm/min.

E. Ensayo Proctor modificado

1) Preparación del método

Se eligió el Método A para ensayos con menos del 25% retenido en tamiz N° 4, usando un molde de 4 pulgadas y pisón de 10 lbf con caída de 18 pulgadas.

2) Preparación de la muestra

Con un peso específico de 1.55 kg/cm³, se determinó que caben aproximadamente 1455.47 kg en el molde, pero se usarán 2 kg de muestra. Se ajustó el contenido de humedad a 2%, 4% y 6%.

3) Compactación del espécimen

Se compactó el suelo en cinco capas de 25 golpes cada una, asegurando uniformidad y lubricación del molde para facilitar el desmoldeo.

4) Pesaje del molde

Se enrasó el espécimen y se pesó el molde con el suelo compactado, registrando también el peso inicial del molde.

5) Secado y pesaje de las muestras

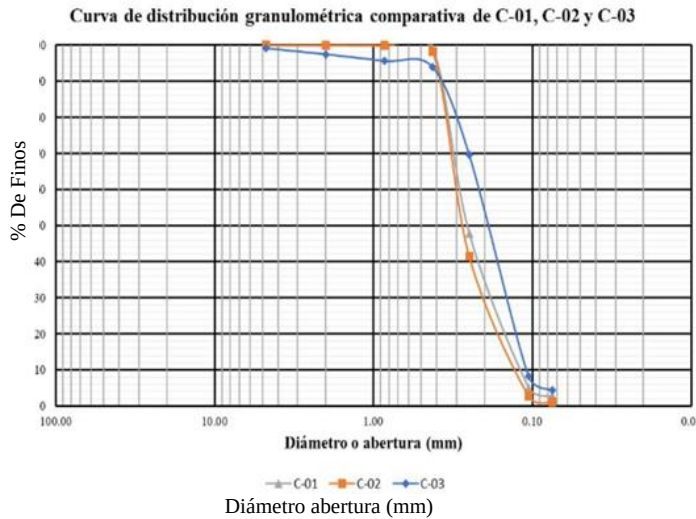
Se extrajo el centro de la muestra cilíndrica. Luego, se dejó secar en el horno durante 24 horas y se pesó posteriormente.

TABLA I
CANTIDADES DE PET TRITURADO Y ARENA

Porcentaje de PET triturado	Cantidad de PET triturado	Cantidad de muestra de arena
2%	2.77 g	135.53 g
4%	5.53 g	132.77 g

VII. RESULTADOS

1) Granulometría



2) Clasificación SUCS

TABLA II
EVALUACIÓN GRANULOMÉTRICA PARA SUCS

EVALUACIÓN GRANULOMÉTRICA			
MUESTRA	C-01	C-02	C-03
% QUE PASA EL TAMIZ N°4	100	100	99.11
% QUE PASA EL TAMIZ N°200	2.77	1.06	4.41
% FRACCIÓN FINA	2.77	1.06	4.41
% FRACCIÓN GRAVA	0	0	0.89
% FRACCIÓN ARENA	97.23	98.94	94.70
CU	2.50	2.44	2.06
CC	0.94	1.04	0.86
SÍMBOLO DEL GRUPO	SP	SP	SP
NOMBRE DEL GRUPO	ARENA MAL GRADADA	ARENA MAL GRADADA	ARENA MAL GRADADA

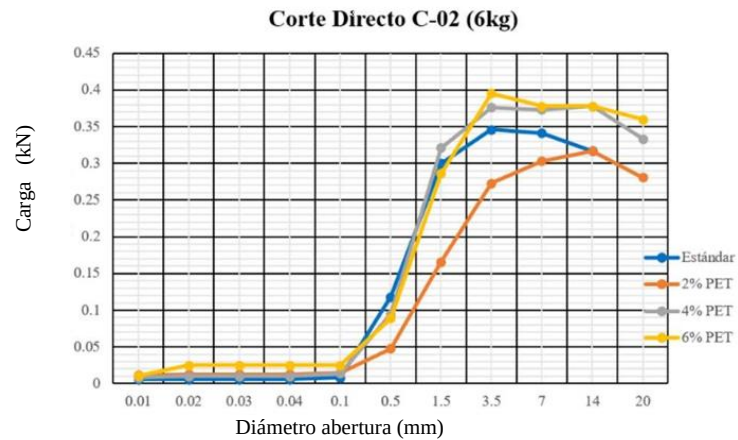
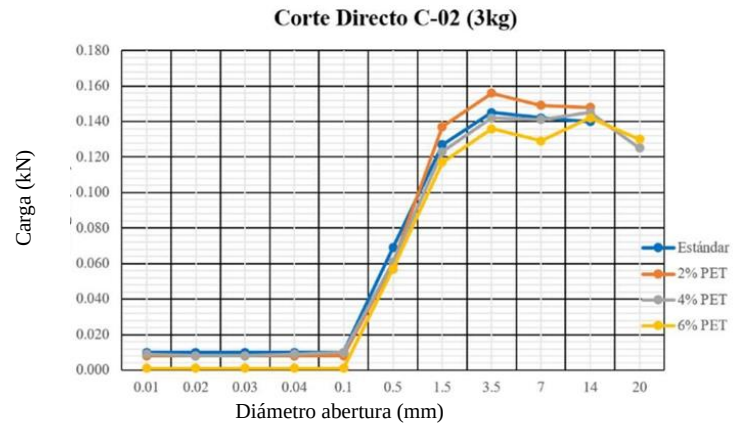
3) Contenido de humedad

TABLA III
CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL DEL SUELO

EVALUACIÓN GRANULOMÉTRICA			
MUESTRA	C-01	C-02	C-03
Peso tara + suelo húmedo (g)	193	138	135
Peso tara + suelo seco (g)	191	136	130
Peso del Agua (g)	2	2	5
Peso de la tara (g)	93	38	35
Peso del suelo seco (g)	98	98	95
Contenido de humedad (%)	2	2	5.3

Se utilizará exclusivamente la calicata C-02 debido a que esta muestra se considera la más representativa.

4) Corte directo



Se procesaron los datos obtenidos en el ensayo de Corte Directo para obtener el Ángulo de Fricción:

TABLA IV
ÁNGULO DE FRICCIÓN ϕ DE LA CALICATA C-02

Comparación de Ángulo de Fricción ϕ – Calicata C-02								
Muestra	C-02 (Estándar)		C-02 (2% PET)		C-02 (4% PET)		C-02 (6% PET)	
Pesos	3 kg	6 kg	3 kg	6 kg	3 kg	6kg	3 kg	6 kg
Esfuerzo Normal	0.84	1.68	0.84	1.68	0.84	1.68	0.84	1.68
Esfuerzo Cortante (Máximo)	0.35	0.84	0.38	0.68	0.35	0.96	0.33	1.00
Pendiente	0.59		0.36		0.73		0.80	
ϕ (rad)	0.53		0.35		0.63		0.68	
ϕ (°)	30.63		19.81		36.23		38.77	

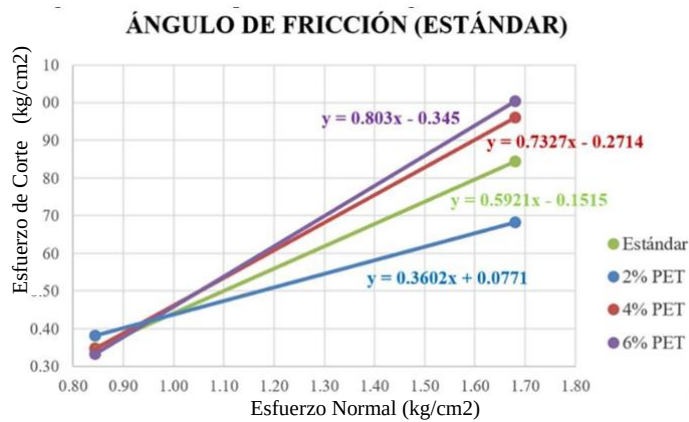


Fig. 4 Gráfico comparativo de los Ángulos de Fricción

5) Capacidad Portante

TABLA V
CAPACIDAD PORTANTE DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

Suelo arenoso	15.50 kN/m ³	Forma de la cimentación	Cuadrada
Cohesión del suelo ¹	0.00 kN/m ²	B	1.00 m
Factor de Seguridad ²	3	Sc	1.30
Profundidad de la base Df	1.80	Sy	0.80
Muestra	Angulo de fricción	Capacidad	Portante
		Falla general *	Falla Local**
Estándar	30.63°	2.75 kg/cm ²	0.93 kg/cm ²
2% PET triturado	19.81°	0.77 kg/cm ²	0.39 kg/cm ²
4% PET triturado	36.23°	5.80 Kg/cm ²	1.56 kg/cm ²
6% PET triturado	38.77°	8.40 kg/cm ²	2.02 kg/cm ²

¹Se considera cohesión despreciable por ser una arena.

² Frente a una falla de corte que presente cargas estáticas.

* Capacidad portante del suelo antes de la falla cortante del suelo.

** Capacidad portante del suelo después de la falla cortante del suelo.

Se calculará la máxima densidad seca para el suelo arenoso con 6% de PET triturado, puesto que presenta un mayor ángulo de fricción y una mejor capacidad portante.

6) Proctor modificado

TABLA VI
ANÁLISIS DE DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD

Diámetro del molde	4" (10.16 cm)	N° de capas	5
Volumen del molde	938.16 cm ³	N° de golpes	25
N° de ensayo	1	2	3
Agua agregada	2% (40 mL)	4% (80 mL)	6% (120 mL)
Peso muestra húmeda más molde	5.721 g	5.782 g	5.779 g
Peso del molde	4.191 g	4.211 g	4.191 g
Densidad húmeda	1.631 g/cm ³	1.675 g/cm ³	1.693 g/cm ³
Tara	A&T -2T	A&T -4%	A&T -6 %
Peso muestra húmeda más tara	133.10 g	131.40 g	132.80 g
Peso muestra seca más tara	130.00 g	126.40 g	125.80 g
Peso del agua	3.10 g	5.00 g	7.00 g
Peso de tara	33.10 g	31.40 g	32.80 g
Peso muestra seca	96.90 g	95.00 g	93.00 g
% de Humedad	3.20 %	5.26%	7.53 %
Densidad Seca	1.58 g/cm ³	1.591 g/cm ³	1.574 g/cm ³

Curva Proctor

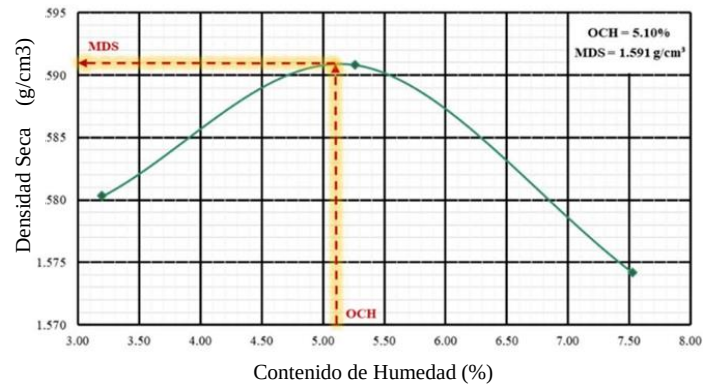


Fig. 5 Relación entre densidad seca y contenido de humedad

VIII. DISCUSIONES

La caracterización del suelo mediante pruebas de granulometría reveló que es arena mal graduada, lo cual coincide con el "Estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico en Lima y Callao", destacando la importancia de los métodos de análisis directos para la clasificación de suelos.

Un hallazgo clave de nuestra investigación fue que la incorporación de un 6% de PET triturado al suelo mejora significativamente su ángulo de fricción interna, superando los incrementos del 2% y 4%. Además, al añadir un 2% de PET, se observó una disminución en el ángulo de fricción. La mejora con el 6% sugiere una interacción óptima entre las partículas de PET y la arena mal graduada.

En cuanto a la capacidad portante, el análisis estableció un valor de 2.75 kg/cm² para el suelo estándar, mientras que la incorporación del PET triturado al 6% elevó este parámetro a 8.40 kg/cm², lo que representa una mejora del 305.45%. Esta notable capacidad portante sugiere que el uso de PET triturado puede ser una estrategia eficaz para el reforzamiento del suelo en aplicaciones de cimentación.

Se determinó que el contenido óptimo de humedad se sitúa en el 5.10%, junto con una densidad seca máxima de 1.591 g/cm³ para el suelo arenoso con un 6% de PET triturado. Estos hallazgos no solo aportan al conocimiento actual en ingeniería civil, sino que también promueven prácticas sostenibles en la gestión de residuos plásticos dentro del contexto de la construcción.

IX. CONCLUSIONES

- Ángulo de fricción efectivo: La incorporación de PET triturado al 6% en el suelo arenoso ha demostrado un impacto positivo en el ángulo de fricción efectivo, que aumentó de 30.63° en la muestra estándar de suelo arenoso a 38.77° en la muestra modificada. Este incremento sugiere una mejora considerable en la resistencia al deslizamiento del suelo.

- **Capacidad portante:** La capacidad portante de la muestra estándar de suelo arenoso fue de 2.75 kg/cm², mientras que la adición de 6% de PET triturado elevó este valor a 8.40 kg/cm². Este aumento significativo en la capacidad portante indica que el PET triturado mejora la resistencia del suelo arenoso, proporcionando una solución efectiva para cimentaciones en terrenos con características mecánicas deficientes.

- **Dosificación óptima:** La dosificación óptima de tereftalato de polietileno triturado en el suelo arenoso se ha determinado en un 6%, lo que resulta en un óptimo contenido de humedad del 5.10%. Este contenido de humedad es crítico para alcanzar una máxima densidad seca de 1.591 g/cm³ en el suelo arenoso estándar, asegurando que el material se encuentre en su estado más compacto y estable.

- **Impacto general:** El uso de tereftalato de polietileno triturado en el suelo arenoso, conforme a las normativas del RNE-E.050, ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar las propiedades mecánicas del material en el AA. HH. Oasis 1^{er} Sector Pachacútec, Ventanilla, Callao, 2025. Los resultados obtenidos reflejan un avance significativo en la capacidad portante y el ángulo de fricción efectivo, lo que resalta la viabilidad del PET triturado como un aditivo en la ingeniería geotécnica, promoviendo prácticas constructivas más sostenibles y eficientes.

REFERENCES

- [1] CISMID, "Estudio de microzonificación sísmica, mapas de peligros múltiples y análisis de riesgo de los distritos de Cercado de Lima, Ventanilla y de las ciudades de Chinchipe y Contumaza," Oct. 2012, Lima. Accessed: Aug. 31, 2024. [Online]. Available: https://n9.cl/sigrid_cismid_microzventanilla
- [2] Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, "Capítulo III – actualización de la microzonificación ecológica económica de la Provincia Constitucional del Callao - 2011," 2011.
- [3] Ministerio del Ambiente, "Mapa de suelos en los distritos de Lima," 2012.
- [4] A. F. Cespedes Malpartida and E. J. Sánchez Rocha, "Mejoramiento de suelo arenoso con la adición de micro plástico PET al 0.8%, 1.0%, 1.5% y 3.0% para la construcción de lozas en el distrito de Chorrillos," Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte, Lima, 2023. Accessed: Aug. 31, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11537/36409>
- [5] A. Iravanian and A. B. Haider, "Soil Stabilization Using Waste Plastic Bottles Fibers: A Review Paper," IOP Conf Ser Earth Environ Sci, vol. 614, no. 1, p. 012082, Dec. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/614/1/012082
- [6] D. M. P. Balani, M. Kikumoto, and Y. Cui, "Enhanced sand strength through low-density polyethylene reinforcement," Constr Build Mater, vol. 409, p. 133928, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133928.
- [7] U. Divyangani and C. Hettiarachchi, "A Review on The Utilization of Geosynthetics and Natural Fibers in Enhancing the Pavement Subgrade Strength," Dec. 2023.
- [8] M. Abukhattala and M. Fall, "Geotechnical characterization of plastic waste materials in pavement subgrade applications," Transportation Geotechnics, vol. 27, p. 100472, Mar. 2021, doi:10.1016/j.trgeo.2020.100472.
- [9] J. W. dos S. Ferreira, P. C. Senéz, and M. D. T. Casagrande, "Pet fiber reinforced sand performance under triaxial and plate load tests," Case Studies in Construction Materials, vol. 15, p. e00741, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00741.
- [10] R. S. Tawfeeq, B. M. M. Salih, and H. A. Atiyah, "Soil reinforcement by re-using liquid packaging waste materials as a geotechnical engineering application," Periodicals of Engineering and Natural Sciences, vol. 10, no. 4, pp. 18 - 30, Jul. 2022, doi:10.21533/pen.v10i4.3119.
- [11] N. R. Malidarreh, I. Shooshpasha, S. M. Mirhosseini, and M. Dehestani, "Effects of recycled Polyethylene terephthalate fibers on strength behavior of cemented Babolsar sand," Scientia Iranica, vol. 27, no. 3, pp. 1130 - 1143, 2020, doi:10.24200/sci.2018.5468.1295.
- [12] D. C. Jin, D. Kalumba, and F. C. Chebet, "Laboratory Investigation of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Soil Reinforcement Material," 2019. doi: <https://doi.org/10.32075/17ECMSG-2019-0768>.
- [13] B. Khalid and F. Alshawmar, "Exploring the Feasibility of Using Recycled PET Strips with Palm Leaf Ash for Sustainable Soil Stabilization," Sustainability, vol. 15, no. 18, p. 13542, Sep. 2023, doi: 10.3390/su151813542.
- [14] A. Jain, S. Mittal, and S. K. Shukla, "Use of polyethylene terephthalate fibres for mitigating the liquefaction-induced failures," Geotextiles and Geomembranes, vol. 51, no. 1, pp. 245 - 258, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.geotextmem.2022.11.002.
- [15] N. Jafari, R. Noorzad, and B. Tanegonbadi, "Liquefaction potential of reinforced sand with plastic wastes," Scientia Iranica, vol. 29, no. 6, pp. 2850 - 2867, Jun. 2022, doi:10.24200/sci.2022.57593.5318.
- [16] A. Hasanzadeh and I. Shooshpasha, "PET fiber reinforcement efficiency in the mechanical and microstructural characteristics of cemented sand modified with silica fume," Constr Build Mater, vol. 397, p. 132363, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132363.
- [17] F. Atiqah Abdul Azam, R. Bt Che Omar, R. Bte Roslan, I. N. Z. Baharudin, and N. H. M. Muchlas, "Enhancing the soil stability using biological and plastic waste materials integrated sustainable technique," Alexandria Engineering Journal, vol. 91, pp. 321 - 333, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.aej.2024.02.016.
- [18] L. Suthar, S. Meena, and U. Kumar, "Utilization of Plastic Waste in Reinforcing Sandy Soil for Sustainable Engineering Applications," Journal of Engineering Sciences, vol. 11, no. 1, 2024, doi:10.21272/jes.2024.11(1).h1.
- [19] A. A. S. Al Alawi, K. Gopalakrishnan, K. Parameswari, A. M. S. Al Aamri, K. S. Al Kaabi, and R. Nirmala, "Enhancement of the existing soil strength using the waste materials as a stabilization resource for sustainable development," Mater Today Proc, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.08.191.
- [20] M. P. Salazar Susunaga, M. F. Cabal Bate, and L. V. Garzón Puentes, "Evaluación del comportamiento del suelo mejorado con adición de fibras pet," STUDIES IN ENVIRONMENTAL AND ANIMAL SCIENCES, vol. 4, no. 1, pp. 146 - 159, Jun. 2023, doi: 10.54020/seasv4n1-011.
- [21] L. Gritsch, G. Breslmayer, R. Rainer, H. Stipanovic, A. Tischberger-Aldrian, and J. Lederer, "Critical properties of plastic packaging waste for recycling: A case study on non-beverage plastic bottles in an urban MSW system in Austria," Waste Management, vol. 185, pp. 10 - 24, Jul. 2024, doi:10.1016/j.wasman.2024.05.035.
- [22] G. Santomasi et al., "Strategies to enhance the circularity of non-bottle PET packaging waste based on a detailed material characterisation," Waste Management, vol. 186, pp. 293 - 306, Sep. 2024, doi:10.1016/j.wasman.2024.06.016.
- [23] M. R. Silveira, P. C. Lodi, N. de S. Correia, R. A. Rodrigues, and H. L. Giacheti, "Effect of Recycled Polyethylene Terephthalate Strips on the Mechanical Properties of Cement-Treated Lateritic Sandy Soil," Sustainability, vol. 12, no. 23, p. 9801, Nov. 2020, doi: 10.3390/su12239801.
- [24] N. Shariatmadari, M. Karimpour-Fard, H. Hasanzadehshooili, S. Hoseinzadeh, and Z. Karimzadeh, "Effects of drainage condition on the stress-strain behavior and pore pressure buildup of sand-PET mixtures," Constr Build Mater, vol. 233, p. 117295, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117295.

- [25] Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, “Norma Técnica E.050 Suelos y cimentaciones, Reglamento Nacional de Edificaciones,” 2018. Accessed: Aug. 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informespublicaciones/887225-normas-del-reglamentonacional-de-edificaciones-rne>
- [26] Instituto Nacional de Calidad, “Descripción e identificación de suelos. Procedimiento visual – manual (NTP 339.150:2001 - Revisada 2015),” 2015.
- [27] Instituto Nacional de Calidad, “Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS). (NTP 339.134:1999 - Revisada 2019),” 2019.
- [28] Instituto Nacional de Calidad, “Metodo de ensayo normalizado para el corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas drenadas. (NTP 339.171:2002 - Revisada 2017),” 2017.
- [29] Instituto Nacional de Calidad, “Método de ensayo normalizado para la capacidad portante del suelo por carga estática y para cimientos aislados. (NTP 31 339.153:2001 - Revisada 2015),” 2015.
- [30] B. M. Das, Fundamentals of Geotechnical Engineering, 4th ed. Cengage Learning, 2013.
- [31] J. D. Márquez Montejó and H. A. Quintero Pineda, “Desarrollo de un software para el cálculo de la capacidad de carga y asentamientos en suelos cohesivos y granulares,” Tesis de grado, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, OCAÑA, 2012
- [32] Colegio Oficial de Geólogos del país Vasco, “Riesgo de deslizamiento del terreno,” 2014. Accessed: Sep.01, 2024. [Online]. Available: <http://www.icog.es/TyT/files/Guia-Deslizamientos-EGEO-cas.pdf>
- [33] H. Cotler, “Manual para evaluar la erosión de los suelos en zonas forestales,” Ciudad de Mexico, 2020. Accessed: Sep. 01, 2024. [Online]. Available: https://fmcn.org/uploads/publication/file/pdf/Manual_de_Suelos_v1.5_dobles_opt.pdf
- [34] J. M. Huaytalla Moreno and J. B. Valenzuela Choque, “Técnicas de mejoramiento en suelos arenosos para mitigar los efectos de la licuefacción en el distrito de Chorrillos,” Tesis de Licenciatura, Universidad Ricardo Palma, 2022.
- [35] E. Botero, L. Muñoz, A. Ossa, and M. Romo, “Comportamiento mecánico del Polietileno Tereftalato (PET) y sus aplicaciones geotécnicas,” Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, vol. 70, pp. 207 – 219, Mar. 2014.
- [36] R. Altadill Colominas et al., Reciclaje de Residuos Industriales, Díaz de Santos. 2009. Accessed: Sep.01, 2024. [Online]. Available: <https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479788353.pdf>
- [37] M. A. Sánchez Sierra and P. A. Paredes Quiroga, “Estudio de Viabilidad Técnica de la Implementación del Polietileno Tereftalato como Material para Estabilización de Taludes,” 2014. Accessed: Sep. 01, 2024. [Online]. Available: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/5cc3ce5c-c4ff-4c22-9455-681810069dc0/content>
- [38] R. R. Cobos, “El polietileno tereftalato (PET) como envase de aguas minerales,” Boletín de La Sociedad Española de Hidrología Médica, vol. 31, no. 2, pp. 179 – 190, 2016, Accessed: Sep. 01, 2024. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dcart?info=link&codigo=6737668&orden=0>
- [39] P. I. Flores León, “Evaluación de la adición de fibras PET provenientes del reciclaje de botellas a la subrasante del suelo, en el área de estacionamiento de la Clínica USAT, 2018-2019,” Tesis de grado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, 2019. Accessed: Oct. 06, 2024. [Online]. Available: <https://tesis.usat.edu.pe/xmlui/handle/20.500.12423/2125>
- [40] SINTAC, “Reciclaje del PET: ¿cómo se recicla y reusa el Tereftalato de polietileno?” Accessed: Sep. 01, 2024. [Online]. Available: <https://sintac.es/reciclaje-del-pet-como-se-recicla-yreusa-el-tereftalato-de-polietileno/>
- [41] Instituto Nacional de Calidad, “Metodo de ensayo para analisis granulometrico. (NTP 339.128:1999 - Revisada 2019),” 2019.
- [42] Instituto Nacional de Calidad, “Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando una energía modificada (2 700 kN-m/m³ (56 000 pie-lbf/pie³)). (NTP 339.141:1999 -Revisada 2019),” 2019.