



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estabilización de suelos con fines de pavimentación
usando el polímero natural de la cabuya**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

**Christian Fernando Rojas Rodríguez
Javier Alejandro García Argomedo**

Asesora:
Mgtr. Ing. Gaby Patricia Ruiz Petrozzi

Piura, junio 2023



Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Christian Fernando Rojas Rodríguez., egresado del Programa Académico/ programa de posgrado de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI 70003871

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor del trabajo final titulado:
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON FINES DE PAVIMENTACIÓN USANDO EL POLÍMERO NATURAL DE LA CABUYA"
El mismo que presento bajo la modalidad de Trabajo de Investigación.¹ para optar el (Título profesional/Grado Académico²) de Título Profesional.
2. Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.
 - Javier Alejandro García Argomedo _____; identificado con DNI N° 71341592
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. _____, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. _____, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. _____, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. _____, identificado con DNI N° Escribir número
3. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
 - Gaby Patricia Ruiz Petrozzi _____, identificado con DNI N° 02810251
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. _____, identificado con DNI N° Escribir número
4. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
5. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
6. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
7. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 19/07/2023


Firma del autor optante³

¹ Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.

² Grado de Bachiller, Título de profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor.

³ Idéntica a DNI, no se admite digital salvo certificado.



Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Javier Alejandro García Argomedo, egresado del Programa Académico/ programa de posgrado de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI 71341592

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor del trabajo final titulado:
"ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON FINES DE PAVIMENTACIÓN USANDO EL POLÍMERO NATURAL DE LA CABUYA"
El mismo que presento bajo la modalidad de Trabajo de investigación.¹ para optar el (Título profesional/Grado Académico²) de Título Profesional.
2. Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.
 - Christian Fernando Rojas Rodríguez, identificado con DNI N° 70003871
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. _____, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. _____, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. _____, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. _____, identificado con DNI N° Escribir número
3. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
 - Gaby Patricia Ruiz Petrozzi, identificado con DNI N° 02810251
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. _____, identificado con DNI N° Escribir número
4. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
5. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
6. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
7. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 19/07/2023


Firma del autor optante³

¹ Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.

² Grado de Bachiller, Título de profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor.

³ Idéntica a DNI, no se admite digital salvo certificado.

Dedicatoria de Christian Fernando Rojas Rodríguez

A mis padres, Hugo Rojas y Paula Rodríguez, por su cariño y apoyo incondicional para cumplir mis metas.

A mis hermanos por el apoyo brindado durante la etapa en la universidad.

A nuestra asesora, Gaby Ruíz, por su apoyo, paciencia y tiempo invertido.



Dedicatoria de Javier Alejandro García Argomedo

A mis padres Javier García y Tania Argomedo por su incondicional apoyo durante toda mi vida en especial durante todo este proceso.

A mi abuelo Milo por todas sus enseñanzas, muestras de cariño y apoyo.

A toda mi familia que siempre ha estado presente en todos mis logros dándome su soporte.

A nuestra asesora Gaby Ruíz, por su confianza, apoyo, paciencia y tiempo.



Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) que, a través de Prociencia, brindó apoyo económico para la realización de esta tesis mediante el convenio 178-202-FONDECYT, proyecto "WASITEK: Desarrollo de un sistema de construcción robótico autónomo para reconstrucción de viviendas post-desastre utilizando materiales locales mejorados con polímeros naturales extraídos de residuos industriales".





Resumen

La necesidad de explorar soluciones sustentables en el ámbito de la infraestructura vial ha llevado en los últimos años a centrar la mirada en los polímeros naturales como opciones de estabilización de suelos en caminos no pavimentados. En la presente investigación se evaluó el comportamiento de un suelo plástico CL al ser estabilizado con el polímero natural de la Cabuya, para aplicaciones de pavimentación. El suelo se estabilizó con el polímero en solución en 3 concentraciones (al 35%, 45% y 65%) macerado a 10 días. Se compararon los límites de Atterberg, las condiciones de compactación, la capacidad portante (CBR), la resistencia a la compresión no confinada y el corte directo con respecto al suelo natural no estabilizado. Los resultados demuestran que el uso de polímero en el suelo CL requiere mayor cantidad de agua para mantener su plasticidad, aumenta la humedad óptima con un ligero incremento de la densidad máxima, pero registra un aumento poco significativo del CBR con una significativa disminución de la cohesión. Se identifica que la concentración en solución de alrededor del 40% es lo adecuado para este tipo de suelo CL, aunque la eficacia de la estabilización no es suficiente para permitir que el suelo califique como subrasante para pavimentación.



Tabla de contenido

Introducción	17
Capítulo 1	19
Marco teórico y conceptual	19
1.1 Comportamiento de los suelos	19
1.2 Estabilización de suelos expansivos	20
1.2.1 <i>Agentes químicos tradicionales</i>	20
1.2.2 <i>Agentes químicos no tradicionales</i>	20
1.3 Estabilización con polímeros	21
1.3.1 <i>Mecanismos de estabilización de los polímeros naturales o biopolímeros</i>	21
1.3.2 <i>Factores que influyen en la estabilización del suelo con polímeros</i>	23
Capítulo 2	25
Metodología	25
2.1 Plan experimental.....	25
2.2 Descripción del polímero y su origen	26
2.2.1 <i>Proceso de extracción</i>	27
2.2.2 <i>Proceso de almacenaje y maceración</i>	28
2.3 Caracterización del suelo.....	28
2.3.1 <i>Granulometría</i>	29
2.3.2 <i>Límites de Atterberg</i>	30
2.3.3 <i>Gravedad específica</i>	30

2.4	Preparación de especímenes	30
2.5	Ensayos en el suelo estabilizado	31
2.5.1	<i>Límites de Atterberg</i>	31
2.5.2	<i>Proctor</i>	32
2.5.3	<i>CBR</i>	32
2.5.4	<i>Compresión no confinada</i>	33
2.5.5	<i>Corte directo</i>	34
Capítulo 3		35
Análisis y discusión de resultados.....		35
3.1	Caracterización del suelo.....	35
3.2	Caracterización del suelo estabilizado con polímero	37
3.2.1	<i>Consistencia</i>	37
3.2.2	<i>Densidad Proctor</i>	39
3.2.3	<i>CBR</i>	41
3.2.4	<i>Compresión no confinada</i>	42
3.2.5	<i>Corte directo</i>	43
Conclusiones.....		45
Recomendaciones.....		47
Referencias bibliográficas		49

Lista de tablas

Tabla 1. Número de especímenes evaluados y ensayos aplicados.	31
Tabla 2. Dosificación del polímero respecto al suelo patrón.	31
Tabla 3. Categorías de subrasante en función de su índice de CBR.	33
Tabla 4. Diferencias entre suelos expansivos y colapsables.	36





Lista de figuras

Figura 1. Diagrama que ilustra la adsorción de moléculas poliméricas neutras sobre una superficie de arcilla y el cambio en la conformación de los polímeros y la desorción de moléculas de agua. (A) Antes de la adsorción del polímero; (B) Después de la adsorción.	22
Figura 2. Esquema del plan experimental.....	26
Figura 3. Cabuya (Furcraea Andina).....	27
Figura 4. Planta de la cabuya y parte del proceso de extracción. (a) Cabuya (Furcraea Andina), (b) Interior de la planta de donde se extrae el aguamiel por exudación y (c) extracto obtenido.	28
Figura 5. Localización del sitio de extracción del suelo en estudio.	29
Figura 6. (a) Toma de muestra de suelo patrón. (b) Suelo patrón in situ. (c) Cuarteo de suelo patrón en laboratorio.....	29
Figura 7. Distribución del tamaño de las partículas del suelo propuesto. NTP 339.128 1999, MTC E 202 2016 y MTC E 109 2016 (Fuente: Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción).	35
Figura 8. (a) Probeta de suelo patrón en condición seca. (b) Probeta sumergida en agua. (c). Probeta desintegrada segundos después de ser sumergida.	37
Figura 9. Límite líquido. NTP 339.129 1999 (Fuente: Elaboración propia).....	37
Figura 10. Límite Plástico. NTP 339.129 1999 (Fuente: Elaboración propia).	38
Figura 11. Índice de Plasticidad. NTP 339.129 1999 (Fuente: Elaboración propia).....	38
Figura 12. Resultados de las pruebas de compactación: Proctor estándar (NTP 339.142 1999)	39
Figura 13. Resultados de las pruebas de compactación: Proctor modificado (NTP 339.141 1999).....	39

Figura 14. Resultados de la máxima densidad seca al variar el contenido de polímero en solución para las pruebas Proctor estándar y modificado (Fuente: Elaboración propia).	40
Figura 15. Resultados del contenido óptimo de humedad al variar el contenido de polímero en solución para las pruebas Proctor estándar y modificado (Fuente: Elaboración propia.) .	41
Figura 16. Resultados del ensayo CBR en el suelo a estabilizar. NTP 339.145 1999 (Fuente: Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción.).....	41
Figura 17. Resultados del ensayo de compresión no confinada en condición húmeda y seca. NTP 339.167 2002 (Fuente: Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción).....	42
Figura 18. Antes y después de los especímenes ensayados a compresión no confinada en condición húmeda y seca.	43
Figura 19. Resultados del ensayo corte directo. NTP 339.171 2002 (Fuente: Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción).....	44



Introducción

El sistema de caminos es fundamental para el desarrollo de las ciudades, debido a que permite satisfacer las necesidades básicas de educación, trabajo, alimentación y salud. Por ello es estratégico para un país desarrollar su sistema vial porque es el único modo con el que logra satisfacer no solo la obligación de viajar, sino también las necesidades esenciales de la población (Boza, 2015).

El Sistema Nacional de Carreteras del Perú (SINAC) está conformado por un total de 12 694 rutas: 158 rutas nacionales, 450 rutas departamentales y 12 086 rutas vecinales. Éste tiene, a su vez, una longitud total de 175 520.7 km, de los cuales el 96.2% es red vial existente y 3.8% es proyectada. De la red vial existente, el 17.2% son carreteras pavimentadas, y el 82.8% son consideradas como carreteras no pavimentadas (MTC, 2020). En este sentido, la calidad de las vías se ven seriamente afectadas por esta condición no pavimentada, limitando el beneficio que supondría la vía si su condición fuera más permanente.

Los proyectos de pavimentación de carreteras se desarrollan sobre superficies naturales geológicamente irregulares, es decir, sobre diferentes tipos de suelo en todo su recorrido. De éstos, los más desfavorables son los suelos arcillosos debido a su baja capacidad portante, alta plasticidad y expansividad en condición saturada. Para superar estas condiciones se proponen alternativas de estabilización para mejorar las características físico - mecánicas de estos suelos. En el Manual de Carreteras del MTC del Perú, se encuentra normada la utilización de estabilizadores como el cemento, cal, productos químicos, sales y emulsiones asfálticas. En el caso de los productos químicos, se han explorado las resinas y los polímeros, aunque no se encuentran completamente regulados o especificados para su aplicación en el ámbito peruano.

El uso de polímeros para la estabilización de suelos es una tecnología relativamente nueva en el Perú. Nesterenko (2018) precisa que el grupo de estabilizadores tipo polímero no se encuentra normado ni definido como alternativa de solución para su uso como estabilizador de suelos en el contexto peruano, a pesar de que su introducción y normalización

es un aporte significativo para los proyectos de pavimentación. Estudios previos (Benites, 2017; Cuipal, 2018; Mora et al, 2020; Ravines, 2010) demuestran que la incorporación controlada de polímeros aumenta la capacidad estructural, la cual puede ser corroborada mediante variables cuantificables en laboratorio como el aumento de la capacidad portante (CBR), el aumento de la densidad (MDD) y la reducción del contenido óptimo de humedad (OMC) del suelo natural a estabilizar. En el caso del extracto de la cabuya, existen antecedentes de su capacidad impermeabilizante frente al agua en adobes, donde la integridad de las unidades estabilizadas con este polímero natural se mantuvo aún después de sumergirlas en agua por 24 horas (Benites, 2017). En la presente investigación se evaluará el comportamiento y respuesta de las propiedades mecánicas como CBR y cohesión de un suelo plástico al ser estabilizado con el polímero natural de la Cabuya.



Capítulo 1

Marco teórico y conceptual

1.1 Comportamiento de los suelos

En estructuras de ingeniería civil, se utilizan varios tipos de suelos; sin embargo, algunos depósitos de suelo en su forma natural son adecuados para fines de construcción, mientras que otros no son adecuados sin tratamiento, como los suelos problemáticos. Estos suelos deben excavarse y luego reemplazarse, o sus propiedades deben modificarse antes de que puedan soportar las cargas aplicadas por las estructuras superiores. Típico de los suelos problemáticos son los suelos expansivos, que se observan con frecuencia debido a su existencia en todo el mundo, excepto en regiones árticas (Steinberg, 2000). Este tipo de suelo causa una cantidad de daños significativos debido a su alta susceptibilidad al cambio de volumen, sensible al contenido de humedad. Las características de cambio de volumen inherentes a los suelos expansivos se deben principalmente a su contenido de minerales arcillosos de grano fino. Debido a la implicancia de costo, los ingenieros geotécnicos a menudo prefieren modificar las propiedades de los suelos de grano fino in situ a través de la estabilización en comparación con el reemplazo del suelo en la práctica (Buhler y Cerato, 2007). En general, los suelos expansivos típicos se pueden identificar fácilmente por su alta plasticidad, levantamiento excesivo y alto potencial de dilatación y contracción, y están compuestos por arcillas, pizarra o marga (Steinberg 2000; Abiodun y Nalbantoglu, 2015).

Debido a la naturaleza adversa del suelo expansivo, los ingenieros geotécnicos buscan constantemente varias opciones para mitigar sus características objetables a través de tecnologías de estabilización de suelos. El objetivo de los ingenieros en la estabilización de suelos expansivos es normalizar el cambio de volumen y las características de plasticidad y trabajabilidad, mientras mejora significativamente las propiedades de resistencia (Petry y Little, 2002).

1.2 Estabilización de suelos expansivos

Para la estabilización del suelo, a menudo se emplean dos métodos, los cuales son estabilización mecánica y química (Estabragh et al, 2013, 2014; Radhakrishnan et al, 2017; Soltani et al, 2018). Cada uno de los dos métodos se puede utilizar de forma independiente o simultánea, en un intento de optimizar cada beneficio. Para suelos expansivos como la arcilla, los ingenieros prefieren la modificación fisicoquímica del suelo para lograr durabilidad (Petry y Little, 2002). Es decir, los cambios de volumen de expansión, contracción y consolidación se calibran manteniendo o mejorando las propiedades relacionadas con la resistencia durante un período prolongado, o que generalmente se logra mediante la estabilización química.

1.2.1 Agentes químicos tradicionales

Los aditivos químicos preexistentes y bien establecidos utilizados en la estabilización de suelos expansivos a menudo se denominan agentes tradicionales. Estos agentes incluyen cal, cemento y cenizas volantes, y generalmente tienen una base de calcio. Como resultado, en presencia de agua, experimentan reacciones químicas dependientes del tiempo tanto inmediatas como prolongadas con el suelo y otros aditivos, lo que da como resultado una mejora general de la matriz del suelo en términos de reducción de la expansión, mejorar de la resistencia al corte y resistencia a la influencia de humedecer y secar (Soltani et al, 2017).

La capacidad de los aditivos tradicionales para la estabilización de suelos expansivos está bien estudiada y se ha demostrado su eficacia como únicos materiales de estabilización (Zhao et al, 2013, 2015; Tran et al, 2014; Dafalla et al 2015; Nweke y Okogbue, 2017). Sin embargo, problemas como el sulfato inducido por el levantamiento resultante de las reacciones suelo-cal-sulfato, el efecto de los materiales orgánicos que inhiben la reacción de los aditivos a base de calcio, los impactos ambientales del proceso de fabricación del cemento y las reacciones de carbonatación cuestionan la sostenibilidad del uso de agentes tradicionales (Jayanthi y Singh, 2016; Firoozi et al, 2017).

1.2.2 Agentes químicos no tradicionales

Otros aditivos que reaccionan químicamente con el suelo, a menudo en presencia de la humedad suficiente para generar interacciones fisicoquímicas en la matriz del suelo, pueden denominarse agentes no tradicionales. Estos materiales incluyen entre otros, materiales de subproductos industriales (como polvo de horno de cemento, polvo de horno de cal, escoria de alto horno granulada molida, ceniza de fondo de carbón pulverizado, escoria de acero, relaves de minas y otros), otros productos de desecho con calcio contenido de óxido (como cenizas de lodo de papel usado), aceites sulfonados, compuestos iónicos y polímeros (Petry y Little, 2002; Alazigha et al, 2016; Fasihnikoutalab et al, 2017; Soltani et al, 2017b, 2018a; Estabragh et al, 2018).

1.3 Estabilización con polímeros

Se han investigado más de un tipo de polímero como reactivos potenciales para la estabilización de suelos. Teniendo en cuenta la complejidad de las estructuras poliméricas y los tipos de polímeros disponibles, se clasifican, según la estructura principal y la fuente, en tres categorías: geopolímeros, polímeros orgánicos sintéticos y biopolímeros (Huang et al, 2021). De estos tres, sólo interesa desarrollar los biopolímeros, que es la categoría en la que se enmarca el extracto de cabuya.

Los biopolímeros o polímeros inducidos por microbios, recientemente se han introducido como un nuevo tipo de estabilizadores de suelos. Se producen a partir de biomasa o bacterias, los cuales son abundantes en la naturaleza, como la celulosa, la lignina y los polisacáridos (Huang et al, 2021).

Aunque las propiedades de los diferentes biopolímeros varían significativamente, generalmente tienen un área específica muy alta, con cargas variables y tamaños de partículas diferentes. Esta característica les permite interactuar con partículas finas del suelo (es decir, limo y arcilla) directamente a través de enlaces iónicos y enlaces de hidrógeno (Chang et al, 2016). Los biopolímeros se deshidratan durante el secado y se aumentan su volumen cuando se rehidratan. Las propiedades elásticas de los hidrogeles de biopolímero, como la resistencia a la tracción y la rigidez, disminuyen exponencialmente con el aumento del contenido de agua (Yakimets et al, 2007). Sin embargo, los hidrogeles de biopolímero viscosos hidratados tienen la capacidad de cubrir las superficies de partículas grandes como la arena y llenar los poros entre las partículas para reducir drásticamente la permeabilidad (Chang et al, 2016).

1.3.1 Mecanismos de estabilización de los polímeros naturales o biopolímeros

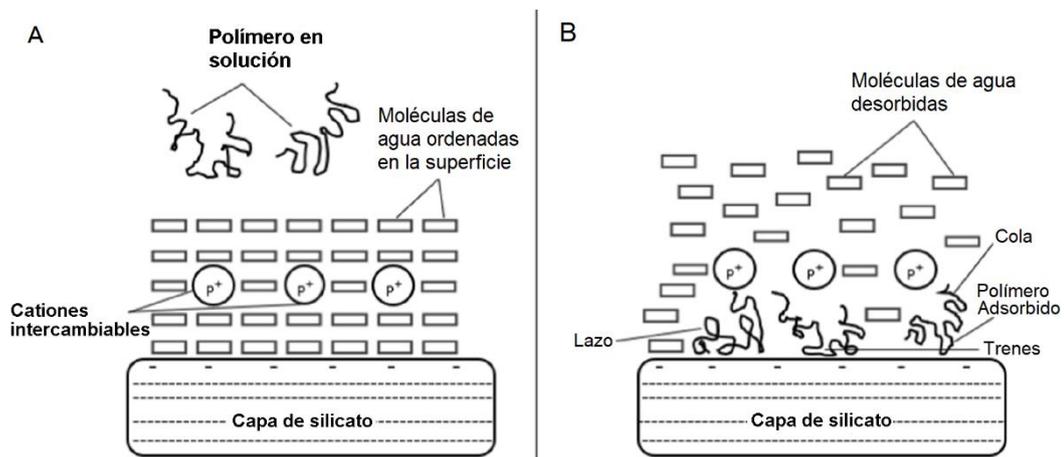
En los polímeros orgánicos, ya sean biopolímeros o polímeros orgánicos sintéticos, el cambio de grupos funcionales de un monómero a otro da como resultado polímeros con diferentes conformaciones y propiedades. Aunque es prácticamente imposible averiguar cómo interactúa cada grupo funcional con los minerales del suelo y cómo cada polímero se comporta de manera diferente entre sí, los mecanismos de interacción entre los polímeros orgánicos y los minerales del suelo siguen algunos principios generales debido a la naturaleza fisicoquímica de los polímeros.

La interacción electrostática es un mecanismo principal para la estabilización de polímeros, especialmente entre polímeros catiónicos (policationes) y arcillas, ya que las superficies de los minerales arcillosos generalmente están cargadas negativamente. Los policationes se adsorben fácilmente en las superficies y bordes de los minerales arcillosos, modifican la absorción del agua cerca de la superficie de la arcilla y dan como resultado partículas floculadas grandes y estables.

En los polímeros neutros, la retención en la superficie de polímeros no cargados por las arcillas es en gran parte impulsada por la entropía. La entropía es la tendencia natural a la

pérdida de orden en un sistema. Un aumento en la entropía ocurre debido a una combinación de adsorción del polímero en la superficie coloidal de la arcilla y la liberación de agua de la superficie como se muestra en la Figura 1. Esto es especialmente cierto para los polímeros de alto peso molecular. Theng (1982) explica que la conformación de la superficie es una de las secuencias contiguas de segmentos adsorbidos, que se alternan con bucles tridimensionales que se extienden desde la superficie. Según Theng (1982), el polímero termina en dos colas que cuelgan libremente. Se esperaría que la desorción de agua de la superficie de la arcilla que acompaña a la adherencia del polímero rompa el enlace de hidrógeno secuencial de las moléculas de agua que se extienden desde la superficie de la arcilla, aumentando así la entropía.

Figura 1. Diagrama que ilustra la adsorción de moléculas poliméricas neutras sobre una superficie de arcilla y el cambio en la conformación de los polímeros y la desorción de moléculas de agua. (A) Antes de la adsorción del polímero; (B) Después de la adsorción



Nota. Adaptado de Huang et al (2021).

Los polímeros aniónicos (polianiones) son floculantes eficaces, especialmente en presencia de cationes polivalentes. Debido a que solo unos pocos segmentos de la cadena del polímero están involucrados en la adsorción, la mayoría están asociados con colas y bucles largos. Esto hace que los polianiones desarrollen una gran "distancia de agarre" que facilita el efecto de puente entre partículas del pH ambiental. Theng (1982) explica que, en condiciones ácidas, los polímeros aniónicos pueden intercalarse en las capas intermedias de arcilla y comportarse de manera similar a los polímeros neutros. Aquí, la interacción electrostática podría tener lugar entre los grupos aniónicos y el aluminio expuesto en los bordes de los minerales arcillosos, que en condiciones ácidas adquiere una carga positiva. En condiciones alcalinas, los polímeros aniónicos se unen con minerales de arcilla principalmente a través de puentes de cationes, ya sea desplazados de la capa intermedia o suministrados externamente.

Esto es promovido por la gran "distancia de agarre" debido a la repulsión electrostática. El proceso de formación de puentes catiónicos da como resultado un aumento

de la entropía inicialmente durante la reacción de complejación, pero finalmente da como resultado enlaces fuertes y complejos de arcilla-polímero.

1.3.2 Factores que influyen en la estabilización del suelo con polímeros

Las estructuras y la mineralogía de los suelos, especialmente las arcillas, también influyen en la eficacia de la estabilización del suelo con polímeros al influir en la adsorción de los polímeros sobre las superficies arcillosas (Huang et al, 2021).

El pH y la concentración de la solución ambiental afectan la carga superficial y la conformación de los polímeros cargados y, por lo tanto, influyen en la adsorción del polímero en las partículas del suelo (Gu y Doner, 1992).

Una concentración más alta de las soluciones de polímero permite que estén disponibles suficientes grupos funcionales y estructurales activos en el polímero para la interacción con las partículas del suelo, lo cual podría aumentar la eficacia de la estabilización del polímero. Sin embargo, el aumento de la concentración normalmente aumenta la viscosidad del fluido y podría dificultar la penetración de las partículas del suelo. Se debe encontrar un equilibrio entre la concentración y la consiguiente viscosidad para asegurar la correcta aplicación de los polímeros (Huang et al, 2021).

La humedad es otro factor importante que puede afectar la eficacia de la estabilización del suelo con polímeros de manera tanto positiva como negativa. Por un lado, la humedad es necesaria en la etapa inicial de la estabilización del polímero para ayudar a que los polímeros se distribuyan uniformemente en las partículas del suelo y contribuyan a la unión entre las moléculas del polímero y los minerales del suelo. De hecho, se requiere cierto nivel de solubilidad del polímero en agua para una distribución eficaz. Los enlaces previamente formados se fortalecen como resultado de la evaporación del agua (Moustafa et al, 1981). Santoni y sus colaboradores (2005), también concluyen que se requiere la evaporación de la humedad o el secado para mejorar la resistencia de suelos no estabilizados tradicionalmente, después de investigar seis polímeros diferentes (composiciones no reveladas) y otros estabilizadores no tradicionales. Sin embargo, la humedad excesiva puede debilitar los suelos estabilizados con polímeros de forma similar a los efectos observados en los suelos estabilizados con cemento y cal. Huang y colaboradores (2021) afirman que la mayoría de las investigaciones que comparan muestras secas y húmedas estabilizadas con polímeros ha mostrado diversos grados de pérdida de resistencia con el aumento del contenido de humedad de los suelos. La clave para una interacción exitosa entre el polímero y el suelo, desde la mezcla y distribución hasta la durabilidad del producto final, puede ser la cinética de la reacción del polímero con el agua durante los períodos transitorios de humectación y secado que afectan el pavimento.



Capítulo 2

Metodología

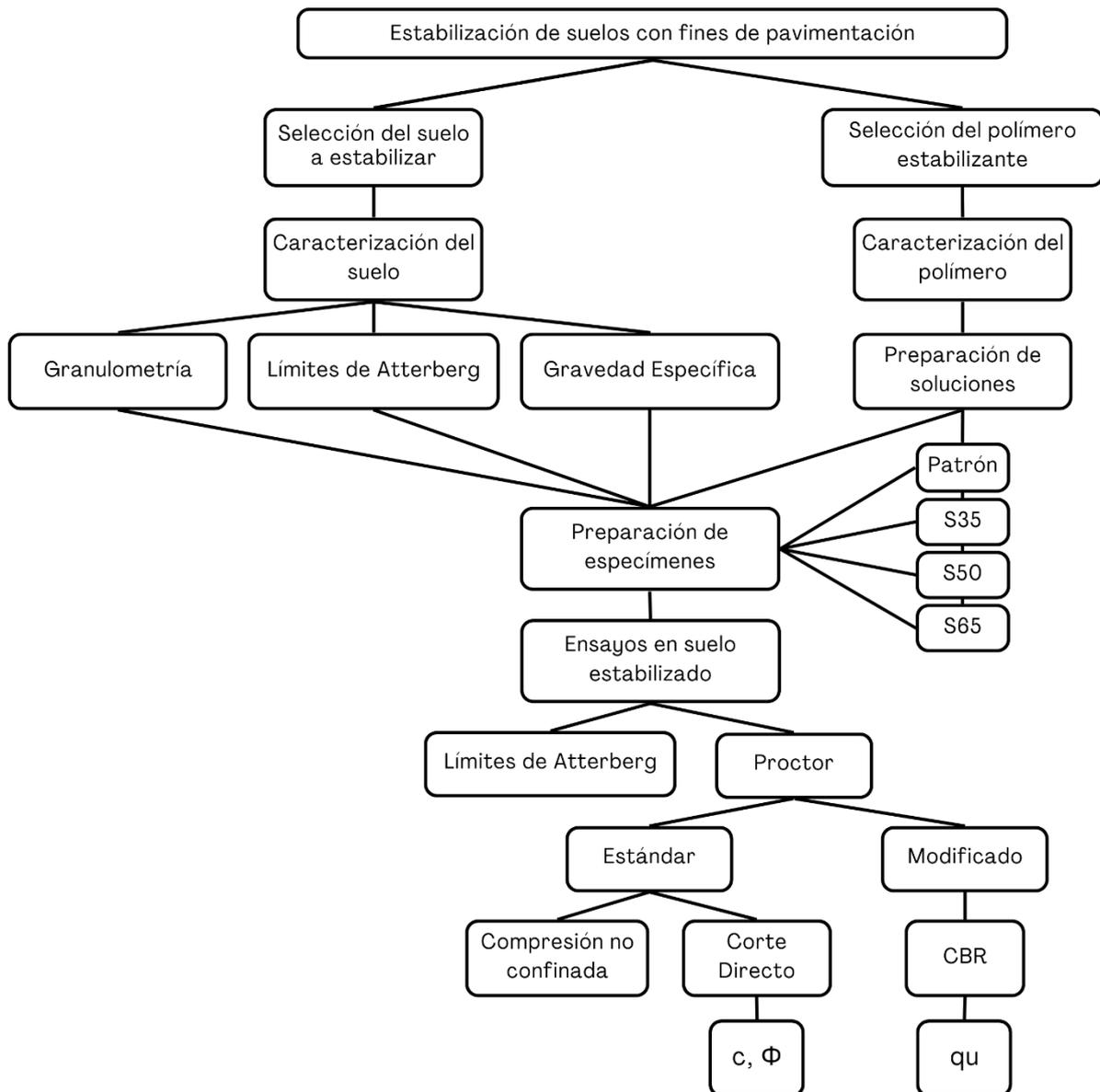
2.1 Plan experimental

Para la evaluación del efecto del polímero natural de la Cabuya se seleccionó un suelo arcilloso de alta plasticidad, debido a que su comportamiento físico-mecánico en condición saturada es desfavorable para proyectos de pavimentación, haciendo más necesaria la aplicación de un método de estabilización.

Se hizo una caracterización del suelo natural, evaluando granulometría, límites de Atterberg y gravedad específica. Posteriormente se prepararon 3 muestras de suelo con contenidos de polímero en solución distintos (35%, 50% y 65%) para una edad de fermentación del polímero de 10 días. La concentración del polímero se midió respecto al volumen de agua usada para la compactación. En cada una de estas muestras con polímero se midió el cambio en los límites de Atterberg, en las condiciones de compactación, la capacidad portante, resistencia a la compresión no confinada y el corte directo con respecto a la muestra patrón (suelo natural).

En la Figura 2 se muestra un esquema de los pasos desarrollados en el plan experimental.

Figura 2. Esquema del plan experimental



2.2 Descripción del polímero y su origen

La *Furcraea Andina*, conocida vernáculamente como cabuya en el Norte del Perú (Pino, 2006), es una planta endémica del Perú, que crece en las yungas y vertientes occidentales andinas, entre los 1450 msnm y 3000 msnm. Esta planta se desarrolla en las regiones costa, yunga y quechua. Perteneciente a la familia de las agaváceas, está provista de espinas en sus bordes con hojas carnosas y muy fibrosas, con flores amarillas y se reproduce por renuevos que brotan del contorno de sus raíces (Barrantes, 2013).

Figura 3. Cabuya (Furcraea Andina)

Se le usa en agroforestería y artesanía por su fibra dura y fina, como chicha o licor de la savia fermentada, como detergente de las hojas, para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, como molusquicida, como insecticida y en el ámbito medicinal como antiparasitario contra la sarna y los parásitos externos (Olano, 1999; Pino, 2006; Aguilar et al., 2007; Quintana, 2010; Olivera et al., 2011; Lozano-Rivas et al., 2012).

En este caso se ha extraído y dejado fermentar la savia o aguamiel. La extracción del jugo azucarado o aguamiel se efectúa antes de que la planta floree, ya que después de que esto sucede, la cabuya muere (Cervantes y Cuya, 2015).

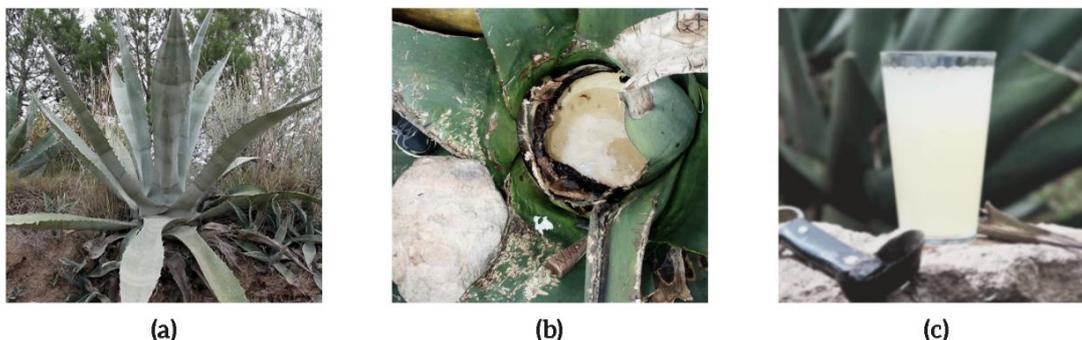
En el laboratorio se ha medido la densidad del aguamiel de cabuya y está en el orden de 1 g/ml y está compuesta por 96.6% de agua y de 3.4% de polímero activo.

2.2.1 Proceso de extracción

Para la extracción del aguamiel de Cabuya, se eligió una planta con el centro de la planta engrosado, específicamente en donde crecen las hojas. Se talla un orificio en el tronco de la planta, para lo cual se cortan las hojas exteriores para facilitar el acceso al centro de la planta. Luego se procede a cortar las hojas interiores para crear un espacio de extracción en el centro de la planta. Finalmente, se realiza un hoyo, y se repite el mismo raspado varias veces hasta producir exudación de savia. Después de que se completa el orificio, el aguamiel se recolecta diariamente. La planta exuda aguamiel por alrededor de 20 días, unos 4 y 10 litros diarios por planta, en promedio.

En la Figura 4 se muestra en detalle la planta de donde se hace la extracción, el centro donde se recolecta el extracto y el líquido al final de la extracción.

Figura 4. Planta de la cabuya y parte del proceso de extracción. (a) Cabuya (*Furcraea Andina*), (b) Interior de la planta de donde se extrae el aguamiel por exudación y (c) extracto obtenido



2.2.2 Proceso de almacenaje y maceración

El proceso de maceración del polímero natural de la Cabuya consiste en dejar el líquido en reposo a temperatura ambiente durante una cierta cantidad de días. Este tiempo el polímero sufre un proceso de descomposición que activa sus propiedades estabilizadoras y da como resultado un mejor comportamiento del suelo estabilizado (Vargas et al., 1986).

Luego de la extracción, el polímero fue almacenado en recipientes plásticos de 5 litros, los cuales fueron congelados al segundo día para preservar las condiciones iniciales del polímero. La disminución de la temperatura, generalmente entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, permite detener el crecimiento bacteriano y reduce las reacciones bioquímicas (Arroyo y Reynoso, 2017). Una vez programada la fecha de realización de los ensayos del laboratorio, el polímero fue descongelado para luego ser fermentado.

Basados en los resultados de Benites (2017) el extracto se dejó fermentar por 10 días. Las condiciones de maceración fueron al aire libre a temperaturas entre 23 y $29\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una humedad relativa entre 60 y 65%.

El polímero se preparó en solución con agua en concentraciones de 35%, 50% y 65% en volumen.

2.3 Caracterización del suelo

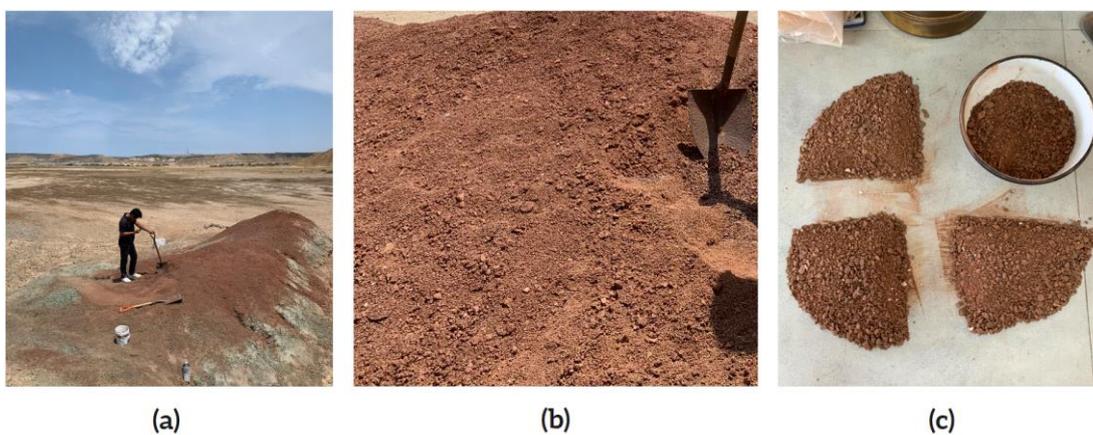
El suelo propuesto a estabilizar con el polímero natural de la Cabuya proviene de la provincia de Paita, departamento de Piura, específicamente de la playa Los Cangrejos (Zona Cantera), al lado de la vía principal de dicho balneario, en la zona sur (Ver Figura 5).

La caracterización se hizo determinando la composición de arena, limo y arcilla, su distribución granulométrica, gravedad específica y límites de Atterberg.

Figura 5. Localización del sitio de extracción del suelo en estudio



Figura 6. (a) Toma de muestra de suelo patrón. (b) Suelo patrón in situ. (c) Cuarteo de suelo patrón en laboratorio



2.3.1 Granulometría

El ensayo de granulometría consiste en determinar la distribución de partículas de agregados grueso y fino de una muestra seca de peso conocido, usando una serie de tamices de apertura cuadrada (NTP 339.128, 1999). En la presente investigación se determinó la cantidad de material fino que pasa el tamiz de $75\ \mu\text{m}$ (N° 200) por lavado (MTC E 202, 2016), además del ensayo análisis granulométrico por medio del hidrómetro (MTC E 109, 2016).

2.3.2 Límites de Atterberg

El ensayo de límites de Atterberg se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la NTP 339.129 1999. El límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP) de los suelos permite correlacionar otras características y propiedades del suelo con su comportamiento en la ingeniería, como la compresibilidad, la permeabilidad, la compactibilidad, la contracción-expansión y la resistencia al corte. Además, nos permite clasificar el material de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y con la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO).

2.3.3 Gravedad específica

La gravedad o peso específicos relativo de las partículas sólidas (Gs) es la relación entre el peso en aire del volumen de un material, a una temperatura indicada y el peso en aire de idéntico volumen de agua destilada a la misma temperatura. El ensayo se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la NTP 339.131 1999.

2.4 Preparación de especímenes

Por ser un suelo arcilloso, se requiere obtener muestras representativas por el método de cuarteo manual (NTP 339.089, 1998), para luego pasar la muestra del suelo propuesto por el tamiz N°4 (4.75 mm). La porción de suelo que pasa ese tamiz es la que se empleó para preparar los especímenes. La fracción retenida de suelo se trituró con el uso de un martillo para luego ser pasada de nuevo por el tamiz N°4.

El polímero se preparó en solución con agua en concentraciones de 35%, 50% y 65% en volumen. Se prepararon 3 muestras de suelo con las soluciones de polímero, además del suelo natural que se usó como muestra de control para la estabilización, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Número de especímenes evaluados y ensayos aplicados

Ensayos		Patrón (Suelo Natural)	Solución de polímero		
			(S35) 35%	(S50) 50%	(S65) 65%
Estabilización con polímero					
Límites de Atterberg		3	3	3	3
Proctor estándar		5	5	5	5
Proctor modificado		5	5	5	5
CBR		3	3	3	3
Compresión no confinada	Condición húmeda	3	3	3	3
	Condición seca	3	3	3	3
Corte Directo		3	3	3	3

Considerando el contenido óptimo de humedad obtenido en la prueba Proctor se ha estimado la dosificación en gramos del polímero activo por cada 1000 gramos de suelo tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Dosificación del polímero respecto al suelo patrón

Proporción de polímero activo (g) por cada 1000g de suelo patrón					
Proctor Estandar (g)			Proctor Modificado (g)		
S35	S50	S65	S35	S50	S65
60	87	109	48	68	68

Con esos datos se procedió a preparar los especímenes para los ensayos CBR, compresión no confinada y corte directo. Cada espécimen se saturó y se almacenó en bolsas plásticas hasta el momento de los ensayos, que en la mayoría de los casos se realizó luego de 24 horas de haber sido mezclado el material con la solución de polímero.

2.5 Ensayos en el suelo estabilizado

2.5.1 Límites de Atterberg

Se evaluaron los Límites de Atterberg siguiendo los lineamientos establecidos en la NTP 339.129 1999, tanto para las muestras estabilizadas con el polímero (S35, S50 y S65) como para la muestra patrón. Una vez que las muestras se humedecieron y se amasaron, se colocaron en bolsas plásticas para que no pierdan humedad y se dejó actuar el polímero por 24 horas.

Para el límite líquido se sacaron muestras de 200 gramos aproximadamente y se ajustó el contenido de humedad añadiendo más solución de polímero. La muestra se saturó hasta conseguir una consistencia que requería 35 golpes para cerrar la ranura en la cuchara de Casagrande. Luego de conseguir la consistencia deseada se retiró la muestra de la cuchara y se pasó a un recipiente de peso conocido, se pesó y se llevó al horno para finalmente obtener el contenido de humedad de la muestra. Todo este proceso se repitió, añadiendo más solución de modo que la consistencia requería menos golpes para cerrar la ranura. Con los 3 valores se trazó una curva y se determinó el contenido de humedad requerido para cerrar la ranura con 25 golpes.

Para el límite plástico se sacaron muestras de 20 gramos de las porciones de suelo humedecidas y amasadas previamente de cada muestra de suelo. Se formaron rollitos que se rodaron sobre una superficie lisa con los dedos de la mano, con la presión necesaria para formar cilindros de unos 3.2 mm de diámetro antes de desmoronarse.

2.5.2 Proctor

Se realizaron los ensayos de Proctor Estándar y Proctor Modificado siguiendo los lineamientos establecidos en la norma del MTC (MTC E 116 y MTC E 115, 2016). Dicho ensayo permite calcular la densidad máxima seca de un suelo en relación con su contenido de humedad utilizando una energía de compactación determinada. Se prepararon 5 especímenes variando el contenido de humedad y midiendo el peso unitario seco de los suelos (curva de compactación). Para el Proctor Estándar se usó un molde de 6 pulgadas y un pisón que produce una energía de compactación de 12400 ft.lbf/ft³ y para el Proctor Modificado se usó un molde de 6 pulgadas y un pisón que produce una energía de compactación de 56000 ft.lbf/ft³.

2.5.3 CBR

El método de ensayo CBR (California Bearing Ratio) mide la capacidad portante del suelo bajo condiciones de densidad y humedad controlada, permitiendo obtener un porcentaje de la relación de soporte de la carga unitaria del ensayo y carga unitaria patrón. El ensayo de CBR se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en el manual de ensayos de materiales MTC E 132 2016.

En pavimentación el valor del índice CBR del suelo de subrasante permite determinar la calidad de subrasante para el desempeño del paquete estructural del pavimento.

Tabla 3. Categorías de subrasante en función de su índice de CBR

Categorías de Subrasante	CBR
S ₀ : Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Subrasante Pobre	De CBR ≥ 3% a CBR < 6%
S ₂ : Subrasante Regular	De CBR ≥ 6% a CBR < 10%
S ₃ : Subrasante Buena	De CBR ≥ 10% a CBR < 20%
S ₄ : Subrasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% a CBR < 30%
S ₅ : Subrasante Extraordinaria	CBR ≥ 30%

Nota. Adaptado de Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2014).

Además, en este ensayo midió la relación humedad-densidad, las propiedades expansivas y la resistencia a la penetración para cada una de las muestras. Se prepararon 3 especímenes para cada concentración de polímero además de la muestra patrón.

2.5.4 Compresión no confinada

El ensayo de compresión no confinada se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en el manual de ensayos de materiales MTC E 121 2016, conocido también con el nombre de ensayo de compresión uniaxial, permite obtener el valor de carga última (q_u) que es la carga por unidad de área a la cual una probeta de suelo falla en el ensayo de compresión simple.

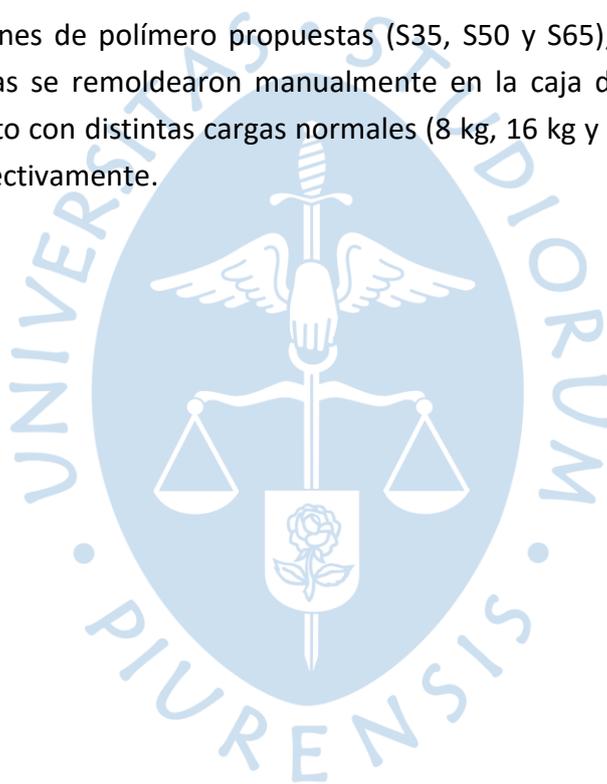
La velocidad de deformación unitaria usada fue de 0.5 mm/min. Se tomaron medidas de las deformaciones y de las carga cada 30 segundo hasta que las cargas comenzaron a disminuir o hasta llegar a una deformación axial del 20% (lo que suceda antes).

Se elaboraron 6 testigos de forma cilíndrica con muestras de suelo con la densidad del Proctor Estándar para cada una de las 3 concentraciones de polímero propuestas (S35, S50 y S65), además de la muestra patrón. Tres de estos testigos se remodelaron manualmente y se sometieron a una carga axial de compresión inmediatamente después de ser remodeladas, es decir, en condición húmeda. Los otros tres restantes fueron remodelados y se dejaron secar al aire durante 7 días para luego ser ensayados en condición seca.

2.5.5 Corte directo

El ensayo de corte directo se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la NTP 339.171 2002. Este ensayo es útil para la determinación bastante rápida de las propiedades de resistencia consolidada drenada debido a que las trayectorias de drenaje a través del espécimen son cortas, el exceso de presión ejercida por los poros puede liberarse más rápidamente que con otras pruebas de drenaje. Los resultados de este ensayo permiten evaluar la relación entre el esfuerzo de consolidación y la resistencia al corte drenada. Al momento de realizar el ensayo, la fuerza de corte se debe aplicar lentamente, en este caso se consideró una velocidad de corte de 0.04 mm/min para ser conservadores y disipar de forma exitosa el exceso de presión de poros de la muestra.

Se prepararon 3 muestras de suelo con la densidad del Proctor Estándar para cada una de las 3 concentraciones de polímero propuestas (S35, S50 y S65), además de la muestra patrón. Estas muestras se remodelaron manualmente en la caja de corte para realizar el ensayo de corte directo con distintas cargas normales (8 kg, 16 kg y 32 kg) para cada uno de los especímenes respectivamente.



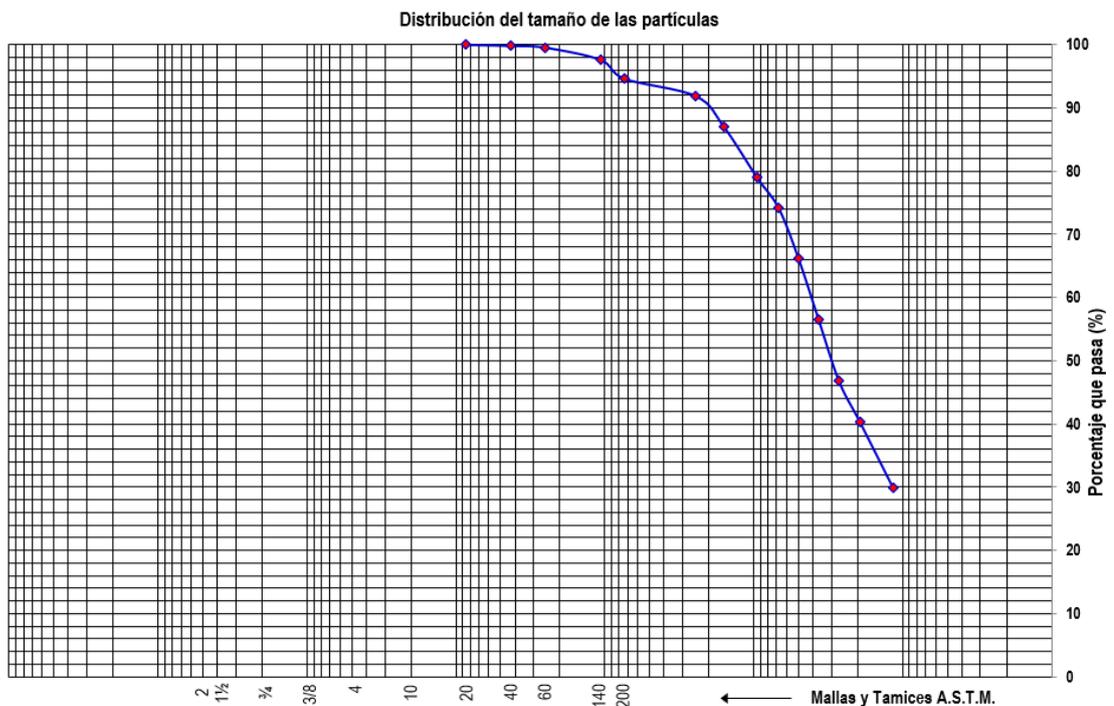
Capítulo 3

Análisis y discusión de resultados

3.1 Caracterización del suelo

El análisis granulométrico se realizó siguiendo las normas NTP 339.128 1999, MTC E 202 2016 y MTC E 109 2016. En la Figura 7 se muestra la distribución del tamaño de partículas del suelo evaluado.

Figura 7. Distribución del tamaño de las partículas del suelo propuesto. NTP 339.128 1999, MTC E 202 2016 y MTC E 109 2016 (Fuente: Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción)



Se puede apreciar de la curva granulométrica que el 95% del suelo pasa la malla N° 200 esto quiere decir que el suelo patrón tiene gran presencia de material fino (limo y arcilla), con límite líquido (LL) de 39%, límite plástico (LP) de 22% e índice de plasticidad (IP) de 17%.

El suelo caracterizado corresponde con una arcilla de baja plasticidad (CL) en el sistema SUCS y con un suelo A-6 (17), en el sistema AASHTO. Este suelo es arcilloso y plástico, con 94% de material que pasa por el tamiz N° 200. Se espera que este suelo experimente grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo, que podría manifestarse como hinchamiento o expansión durante la prueba del CBR. El índice de grupo 17 indica un material de subrasante muy pobre.

Los suelos arcillosos son susceptibles de sufrir hinchamiento, permitiendo una gran incorporación de agua. En función de los cambios de contenido de humedad se dan diferentes estados físicos, siendo los Límites de Atterberg el punto de partida para la estimación de la expansividad de un suelo. La expansión de arcillas provoca daños variados los cuales pueden ser desde grietas, fisuración y rotura de elementos estructurales hasta deformaciones en pavimentos.

Además, se encontró que el suelo es colapsable. Los suelos colapsables tienen una estructura macroporosa, con granulometría predominantemente fina, siendo en su mayoría fracciones de limos y arcillas (Reginatto, 1970). Dicha estructura se mantiene unida por pequeñas cantidades de agentes cementantes que se ablandan con el agua, como arcilla o carbonato de calcio (Barden et al., 1973). Mientras el suelo se mantiene en estado natural o seco, estos cementos producen un suelo fuerte que puede soportar grandes cargas. Sin embargo, si el suelo se satura, estos agentes cementantes se ablandan y la estructura alveolar colapsa.

La Tabla 4 contrasta las características clave de los suelos expansivos y los colapsables que permiten diferenciarlos, ya que muchas veces, la manifestación exterior puede ser similar a través de un asentamiento o reducción del volumen.

Tabla 4. Diferencias entre suelos expansivos y colapsables

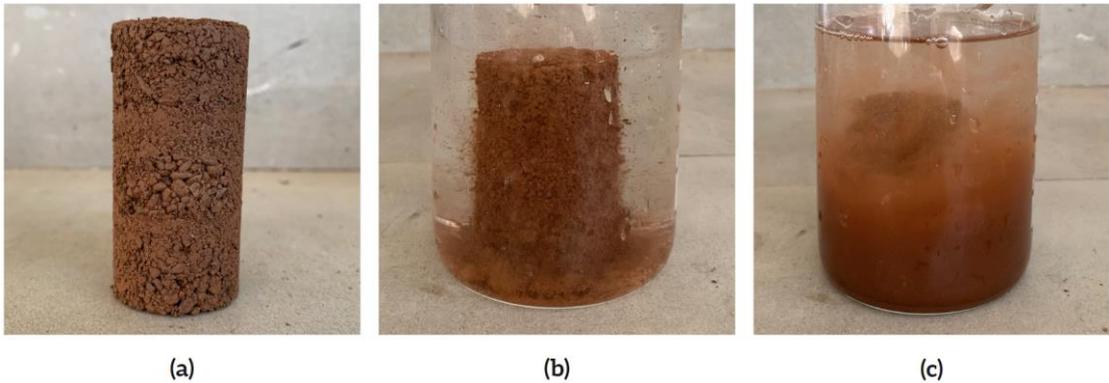
Tipo de suelo	Variación de volumen frente a cambios de humedad (ω)	Límite Líquido	Humedad de suelo saturado (ω_{sat})
Expansivo	$\downarrow \omega \rightarrow \downarrow$ volumen	> 50%	\ll LL
Colapsable	$\uparrow \omega \rightarrow \downarrow$ volumen	< 35%	\cong LL

Nota. Adaptado de Suelos expansivos, suelos colapsables y suelos crióticos. (2022).

Para identificar si el suelo es colapsable, se prepararon probetas densificadas con la humedad del proctor estándar del suelo patrón, las cuales se dejaron secar al aire por una semana para después ser sumergidas en agua y evaluar su comportamiento frente a la

saturación. Tal como se muestra en la Figura 8, se puede observar la interacción del suelo con el agua, obteniendo como resultado la desintegración de la probeta solo en cuestión de segundos. Además, conociendo su Límite Líquido (39%) y comparándolo con los datos de la Tabla 4, podemos concluir que el suelo patrón oscila entre un suelo colapsable y uno expansivo.

Figura 8. (a) Probeta de suelo patrón en condición seca. (b) Probeta sumergida en agua. (c) Probeta desintegrada segundos después de ser sumergida



3.2 Caracterización del suelo estabilizado con polímero

3.2.1 Consistencia

Los límites de Atterberg se evaluaron para verificar el cambio en la capacidad del suelo de ser moldeable al combinarse con el polímero en solución. En las Figura 9, Figura 10 y Figura 11 se muestran los resultados del ensayo de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad respectivamente.

Figura 9. Límite líquido. NTP 339.129 1999

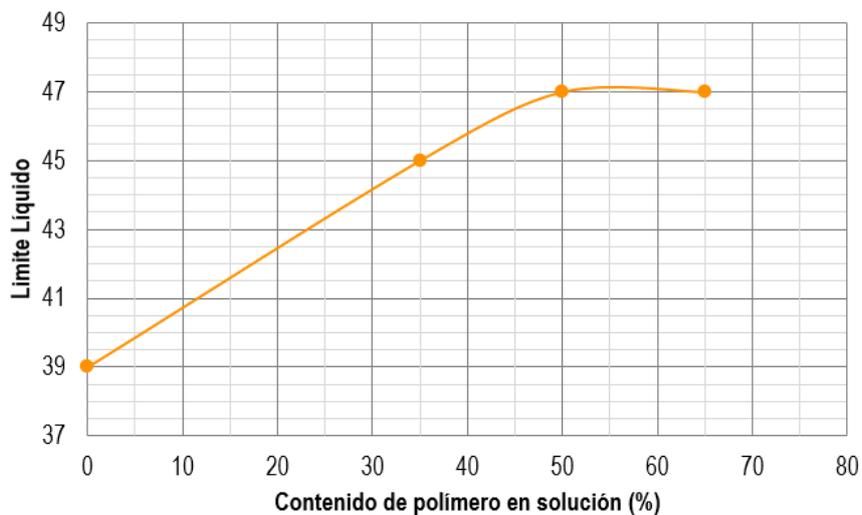
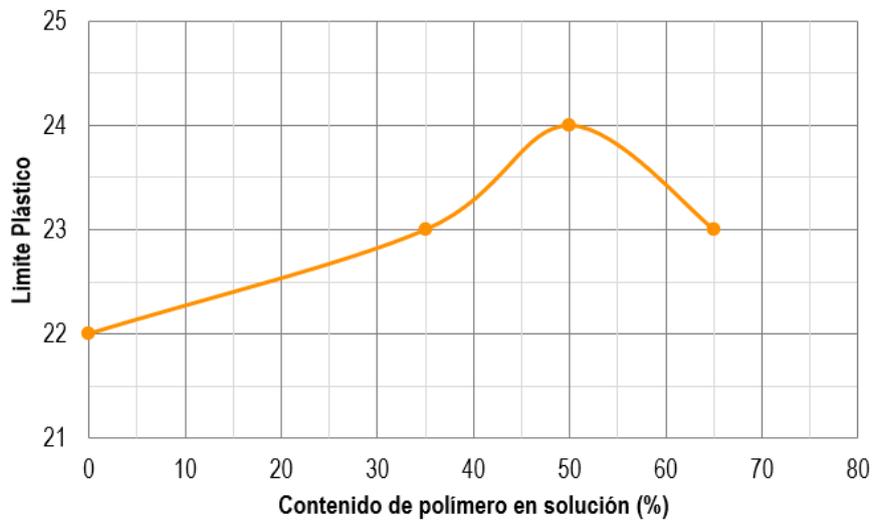
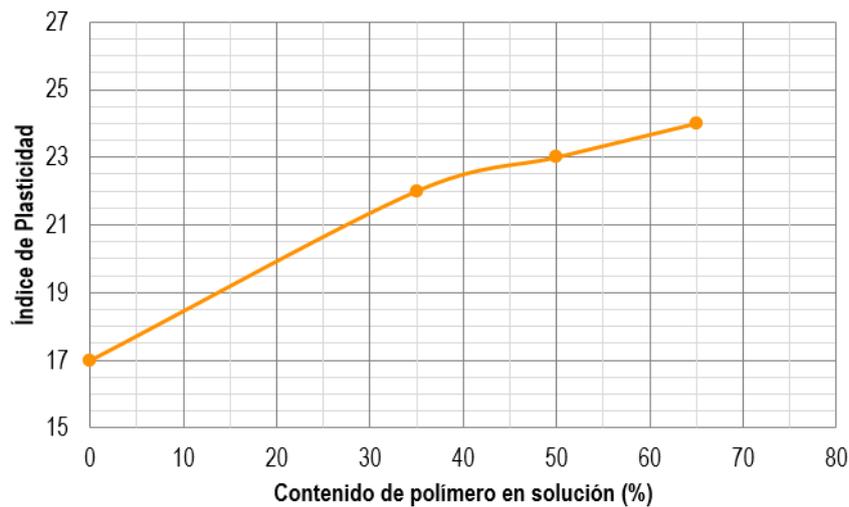


Figura 10. Límite Plástico. NTP 339.129 1999**Figura 11. Índice de Plasticidad. NTP 339.129 1999**

Se puede observar que, en todos los casos, los límites de Atterberg se incrementan cuando se adiciona el polímero. Esto supone que el suelo requiere un contenido de humedad mayor para moldearse y modificar su condición líquida o plástica. En ese sentido se podría considerar este efecto como positivo, pues el material se mantiene plástico aún con un contenido de humedad elevado y es capaz de mantener su consistencia a pesar del efecto del agua. Esto advierte que el material pueda mantener cierta integridad a pesar de la humedad y, por tanto, confirma los resultados que obtuvo Benites (2017) en su investigación con adobes, cuando mantienen la integridad a pesar del contacto con el agua. También el aumento del límite líquido indica que la adición de polímero mejora su condición de suelo colapsable llevándolo a estar cerca de los valores necesarios para considerarlo expansivo.

3.2.2 Densidad Proctor

La máxima densidad seca y la humedad óptima se obtuvo mediante los ensayos de Proctor Estándar y Modificado, realizados según las NTP 339.142 1999 y NTP 339.141 1999 respectivamente. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 12 y Figura 13.

Figura 12. Resultados de las pruebas de compactación: Proctor estándar (NTP 339.142 1999)

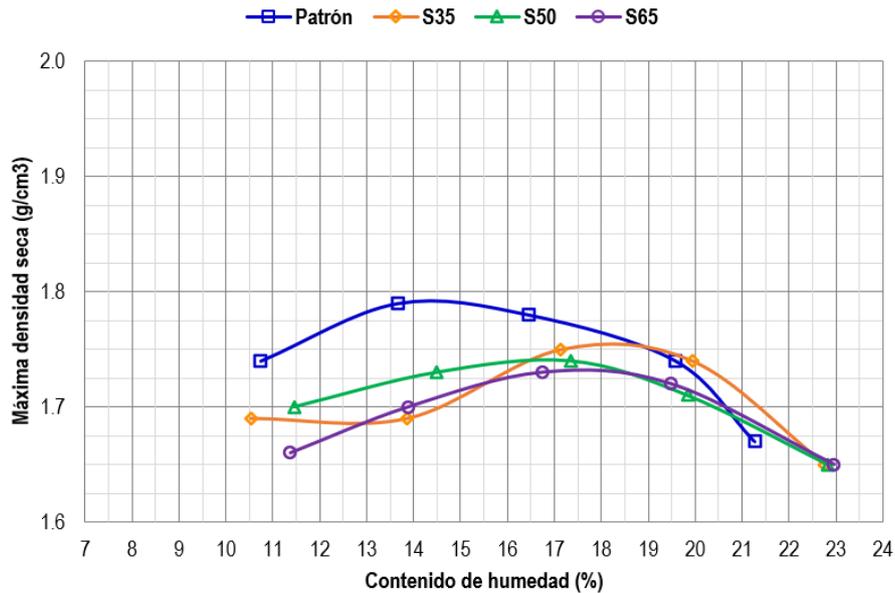
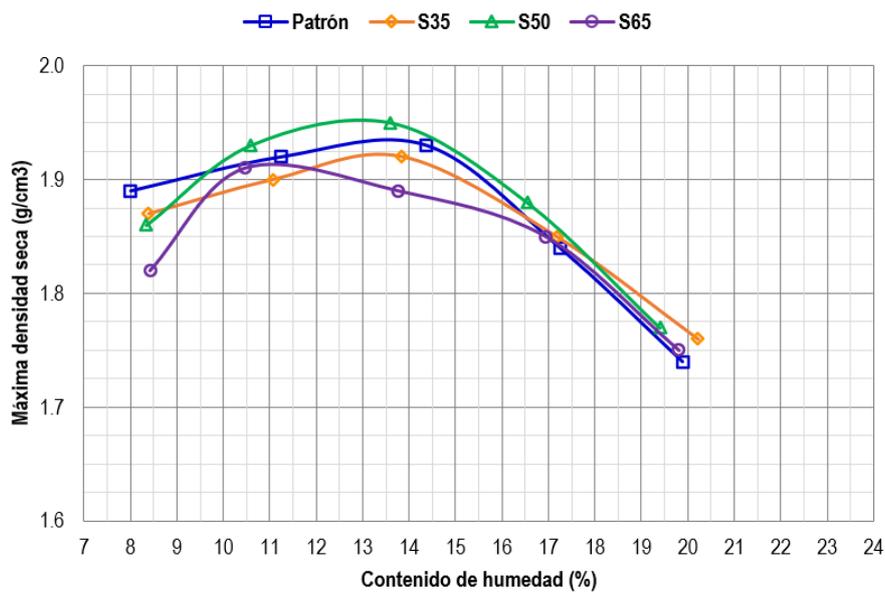


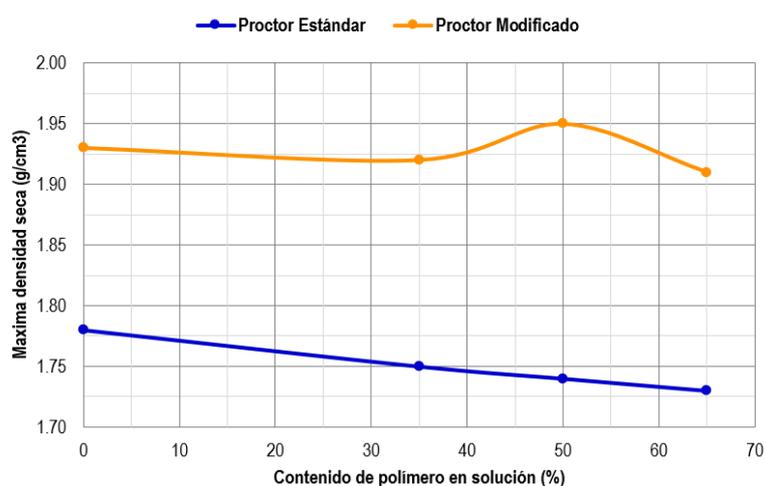
Figura 13. Resultados de las pruebas de compactación: Proctor modificado (NTP 339.141 1999)



Se puede verificar que la adición de polímero reduce la máxima densidad seca respecto al suelo natural, siendo menor cuando se usan bajas energías de compactación, como ocurre en el Proctor estándar. Mientras que al aplicar una mayor energía de compactación (Proctor modificado), hay una menor dispersión de los valores y se obtiene una ligera mejora respecto al suelo original cuando se adiciona polímero en solución al 50%.

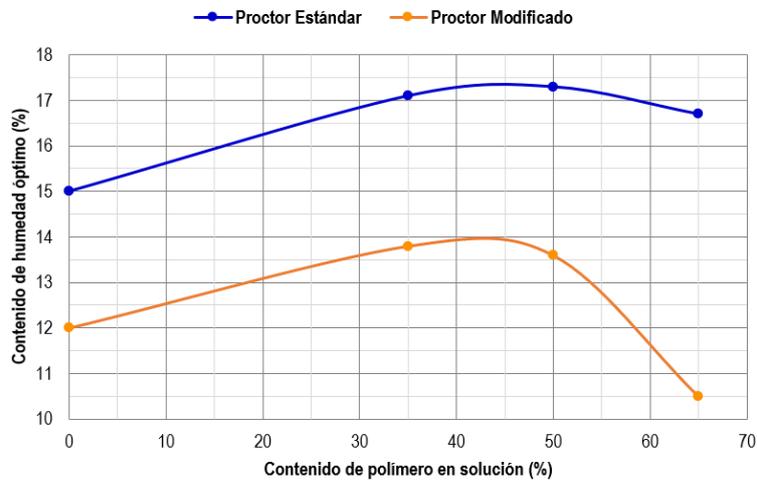
En la Figura 14 se puede comparar únicamente los valores de máxima densidad seca según el tipo de ensayo y del polímero en solución. Se observa que los valores disminuyen ligeramente al incrementar la concentración de polímero en solución. Sin embargo, para una mayor energía de compactación, se puede identificar un cierto incremento para una concentración del 50% de polímero en solución, sugiriendo un contenido óptimo alrededor de este valor; sin embargo, el incremento de la densidad seca es muy pequeña y posiblemente, poco significativa.

Figura 14. Resultados de la máxima densidad seca al variar el contenido de polímero en solución para las pruebas Proctor estándar y modificado



En la Figura 15 se ha graficado la variación del contenido de humedad óptima obtenido respecto a la concentración de polímero en solución. Se puede observar que hay una tendencia a requerir mayor cantidad de agua para lograr la máxima densidad, lo cual es coherente con los resultados de los límites de Atterberg hallados anteriormente. Sin embargo, aquí se nota más claramente un valor óptimo de contenido de polímero en solución, alrededor del 45%, coincidiendo con el resultado observado en la máxima densidad seca del Proctor modificado.

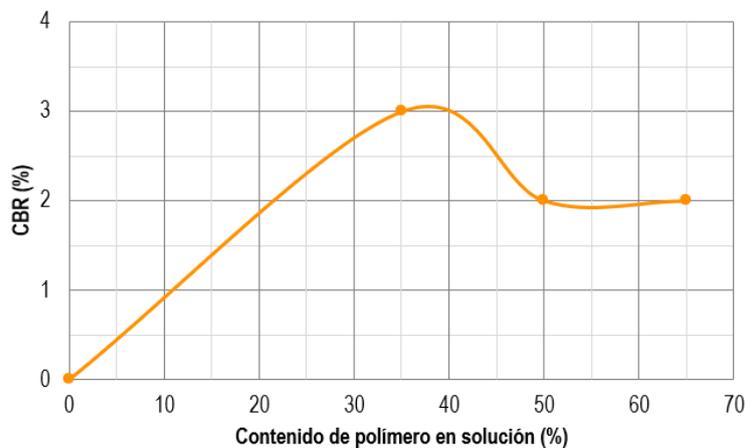
Figura 15. Resultados del contenido óptimo de humedad al variar el contenido de polímero en solución para las pruebas Proctor estándar y modificado



3.2.3 CBR

El ensayo de CBR evalúa la calidad y la capacidad de soporte del suelo, el ensayo fue realizado según la norma NTP 339.145 1999. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 16, donde se ha graficado el CBR respecto a la concentración del polímero en solución.

Figura 16. Resultados del ensayo CBR en el suelo a estabilizar. NTP 339.145 1999

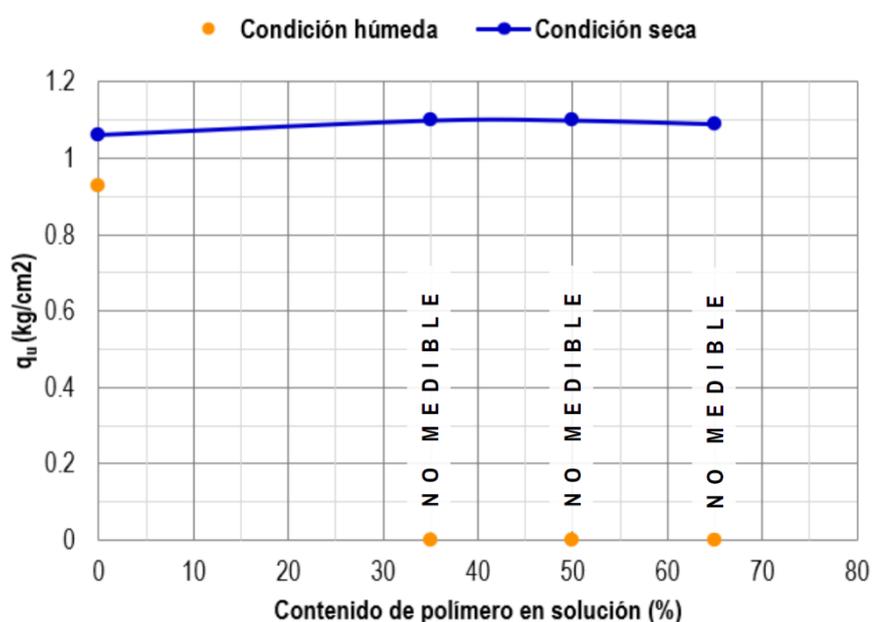


Se puede observar que la capacidad de soporte del suelo natural es de 0% y se incrementa significativamente al adicionar polímero en solución. Aquí, al igual que en las pruebas Proctor, se puede identificar un contenido de polímero óptimo alrededor del 40% el cual logra la máxima capacidad portante del suelo. Sin embargo, llama la atención la bajada brusca para concentraciones altas de polímero en solución. A pesar de esta mejora, el suelo sigue teniendo una baja capacidad de soporte para fines de pavimentación.

3.2.4 Compresión no confinada

El ensayo de compresión no confinada (q_u) permite obtener la cohesión del suelo (c). El ensayo fue realizado según la norma NTP 339.167 2002. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 17, se comparó el q_u del suelo en 2 condiciones las cuales son: condición húmeda con el contenido de humedad óptimo del proctor estándar y la condición seca al ambiente.

Figura 17. Resultados del ensayo de compresión no confinada en condición húmeda y seca. NTP 339.167 2002



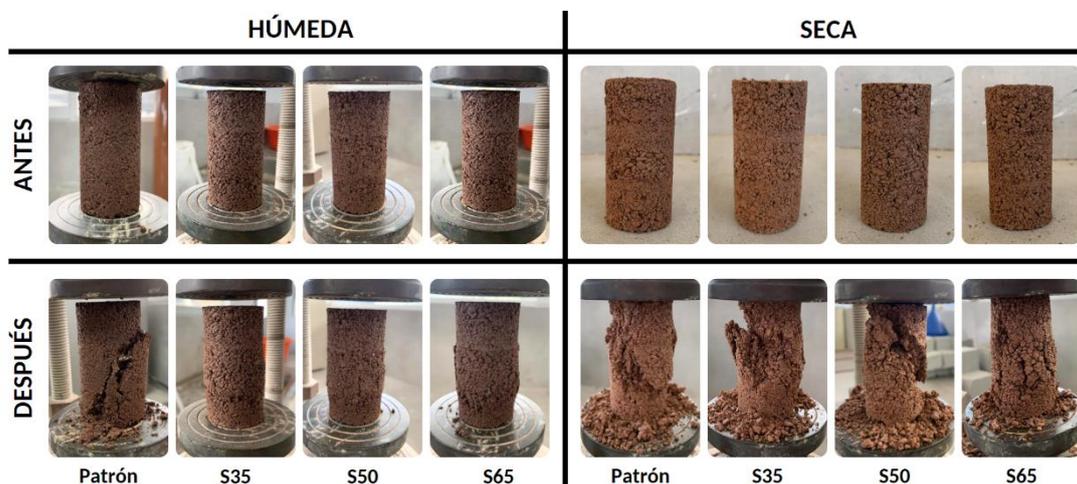
La cohesión es la propiedad básica de un suelo fino de ofrecer resistencia a cambiar de forma, debido al enlace de las partículas, además determina la resistencia al corte de un suelo y es un valor característico de las arcillas. Se puede observar que la resistencia del suelo (q_u) en condición húmeda solo puede ser medible en la muestra patrón obteniendo un valor de 0.93 kg/cm². En cambio, en presencia de polímero no se obtienen lecturas del dial de carga al momento de realizar el ensayo.

En condición seca se puede apreciar un aumento ligero en el q_u alrededor del 40% de contenido de polímero en solución, pero este incremento es mínimo comparado con el de la muestra patrón.

En la Figura 18 se ha consolidado las imágenes de las probetas antes y después del ensayo de compresión no confinada. Se puede observar que en condición húmeda la muestra patrón tiene una falla frágil por corte, sin embargo, en presencia de polímero en las 3 concentraciones en solución se aprecia una falla de flexibilidad plástica, obteniendo una forma abarrilada lo cual dificulta obtener un valor de esfuerzo último o como en este caso que no

fue posible medir dicho esfuerzo. En condición seca se aprecia una similitud en los 4 especímenes, todos tienen una falla frágil o de deslizamiento por cortante puro.

Figura 18. Antes y después de los especímenes ensayados a compresión no confinada en condición húmeda y seca

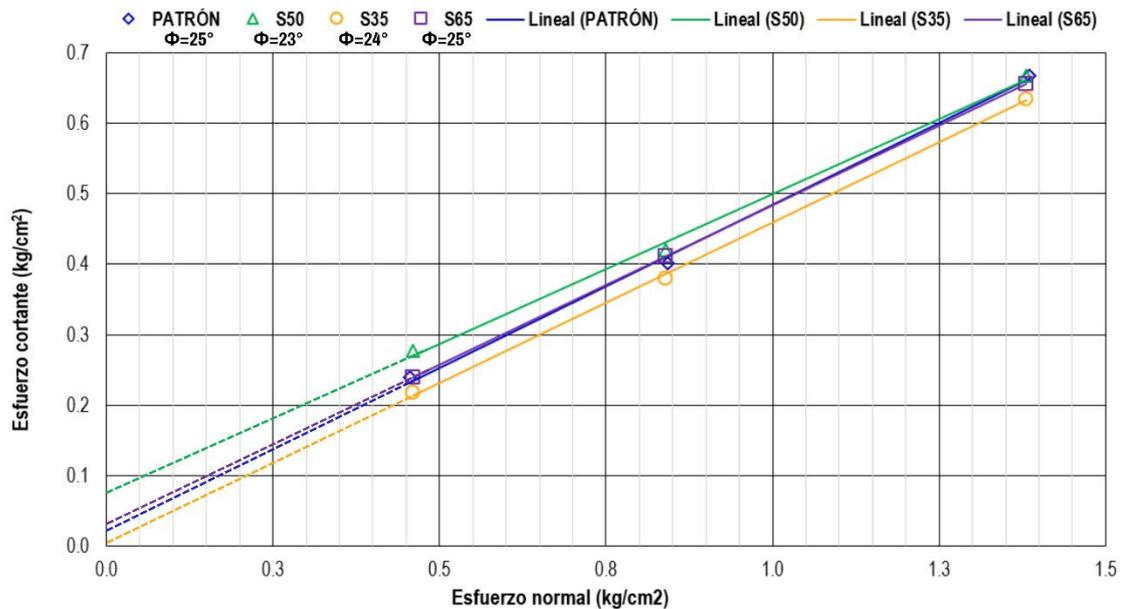


Esto podría indicar que, a pesar de no poder medir una capacidad de carga en las muestras estabilizadas, el comportamiento del suelo en condición húmeda es favorable pensando en su estabilidad. Sin embargo, para poder ser concluyentes se requiere de mayor estudio.

3.2.5 Corte directo

El ensayo de corte directo permite obtener una relación entre el esfuerzo de consolidación y la resistencia al corte drenada, además de la cohesión en condición saturada. El ensayo fue realizado según la norma NTP 339.171 2002. Los resultados obtenidos para la muestra estabilizada de concentración del 50% de polímero S50 y la muestra patrón se muestran en la Figura 19.

Figura 19. Resultados del ensayo corte directo. NTP 339.171 2002



Se puede observar que la presencia de polímero aumenta la resistencia al corte, pasando de 0.02 kg/cm² para el suelo natural a 0.08 kg/cm² para el suelo estabilizado con una concentración de 50% en solución.

Estos resultados son coherentes con los medidos en el ensayo de compresión no confinada, pues los valores de esfuerzo cortante son muy pequeños, en el rango de 0 a 0.1 kg/cm². Sin embargo, no son coherentes para el suelo patrón.

Se puede concluir que la acción del polímero permite reducir hasta casi cero los esfuerzos de corte del suelo, haciendo que su capacidad de respuesta sea más semejante a la de un suelo no cohesivo.

Conclusiones

La presencia de cabuya en el suelo modifica los Límites de Atterberg aumentando la necesidad de agua para cambiar la condición de plástico a líquido. Aunque esto implica una mayor plasticidad del suelo estabilizado, podría suponer un incremento en la trabajabilidad en campo y condiciones favorables para las operaciones de compactación a pesar del contenido de humedad elevado.

La cabuya disminuye la máxima densidad seca y aumenta la necesidad de agua para alcanzar esta densidad en el proceso de compactación. En suelos saturados o en condiciones de clima lluvioso, esta condición podría ser favorable, permitiendo la operación de compactación a pesar del exceso de humedad en el suelo.

La cabuya es capaz de estabilizar suelos arcillosos, reduciendo su cohesión y haciendo que se comporte como un suelo granular, sin perder su capacidad de ser moldeado. Esto impacta positivamente en su comportamiento para fines de pavimentación incrementando su capacidad de soporte CBR de cero a un valor máximo de 3% en condición saturada con la solución de polímero al 40%.

Según los resultados se puede afirmar que el polímero permite estabilizar el suelo y es posible identificar un valor de concentración óptima de polímero en solución alrededor del 40% que produce la mejora en el comportamiento del suelo estabilizado. Sin embargo, para una mejora significativa de las propiedades con fines de pavimentación, la cabuya debe ser usada con otro medio de estabilización como complemento.



Recomendaciones

Evaluar el efecto del polímero natural de la Cabuya en otros tipos de suelos.

Evaluar la eficacia de la Cabuya trabajando en conjunto con otros agentes estabilizantes.





Referencias bibliográficas

- Abiodun, A. y Nalbantoglu, Z. (2015). Lime pile techniques for the improvement of clay soils. Canadian Geotechnical Journal. Canadá
- Aguilar, S. Ramirez, J. Malagón, O. (2007). Extracción de fibras leñosas: Cabuya (*Furcraea andina*) y banano (*Musa paradisiaca*) para estandarizar un proceso tecnológico destinado a la elaboración de pulpa y papel. Revista Iberoamericana de polímeros. Vol. 8.
- Ajayi-Majebi, A., Grissom, W., Smith, L. y Jones, E. (1991). Epoxy-Resin-Based Chemical Stabilization of a Fine, Poorly Graded Soil System. In Transportation Research Record 1295, TRB, National Research Council, Washington, 1991.
- Alazigha, DP. Indraratna, B. Vinod, JS. Ezeajugh, LE. (2016). The swelling behaviour of lignosulfonate-treated expansive soil. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement 2016. Australia.
- Alejo O. Sfriso, Ernesto Strina, Mauro Codevilla. (2022). Suelos expansivos, suelos colapsables y suelos crióticos. Universidad de Buenos Aires.
- Arroyo, C. Reynoso, C. (2017). Evaluación de temperaturas de congelación en la supervivencia de la microbiota del pulque. Revista de Simulación y Laboratorio.
- Barden, L. McGown, A. Collins, K. (1973). The Collapse Mechanism in Partly Saturated Soil. Department of Civil Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, Great Britain.
- Barrantes W. (2013). Efecto de la concentración de sólidos solubles de aguamiel de Cabuya (*Furcraea Andina*) en las características sensoriales de una bebida destilada tipo tequila blanco. Universidad Cesar Vallejo.
- Beltrán, M. y Marcilla, A. (2012). Tecnología de polímeros - Procesado y propiedades. (1ra ed.). Universidad de Alicante, España.

- Benites, V. (2017). Adobe estabilizado con extracto de Cabuya (*Furcraea Andina*). Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. Universidad de Piura.
- Boza, A. G. (2015, 5 diciembre). La red vial es imprescindible para el desarrollo y crecimiento de un país. UDEP Hoy. Recuperado de <https://www.udep.edu.pe/hoy/>
- Buhler R, Cerato A. (2007). Stabilization of Oklahoma expansive soils using lime and class C fly Ash. In: Geo-denver 2007: new peaks in geotechnics. ASCE.
- Cervantes L. & Cuya S. (2015). Elaboración de miel de Cabuya y estudio de prefactibilidad de una planta en el distrito de Huanca Huanca, Provincia de Angaraes, Departamento de Huancavelica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú: Lima.
- Chang, I. Im, J. Cho, G. (2016). Introduction of Microbial Biopolymers in Soil Treatment for Future Environmentally-Friendly and Sustainable Geotechnical Engineering. Sustainability. Korea.
- Chang, I. Im, J. Cho, G. (2016). Geotechnical Engineering Behaviors of Gellan Gum Biopolymer Treated Sand. Canadian Geotechnical Journal. Korea
- COMSA-EMTE y Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. (2012). Utilización de polímeros en la estabilización de suelos para su uso en carreteras. (G-GI-1003-IDI-0, Versión 2). Junta de Andalucía, España.
- Cuipal, B. (2018). Estabilización de la subrasante de suelo arcilloso con uso de polímero sintético en la carretera Chachapoyas – Huancas, Amazonas. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. Universidad Cesar Vallejo.
- Dafalla, M. Mutaz, E. Al-Shamrani, M. (2015). Compressive strength variations of lime-treated expansive soils. IFCEE 2015. ASCE.
- Davidovits, J. (2022). 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference. Australia
- Estabragh, AR. Moghadas, M. Javadi, AA. (2013). Effect of different types of wetting fluids on the behaviour of expansive soils during wetting and drying. Soils and Foundations 2013b. The Japanese Geotechnical Society.
- Fasihnikoutalab, HM. Asadi, A. Unluer, C. Huat, BK. Ball, RJ. Pourakbar, S. (2017). Utilization of alkali-activated olivine in soil stabilization and the effect of carbonation on unconfined compressive strength and microstructure. Journal of Materials in Civil Engineering 2017. Malaysia.
- Firoozi, A. Olgun, C. (2017). Fundamentals of Soil Stabilization. International Journal of Geo-Engineering. Malaysia.
- Gu, B. Doner, H. (1992). The Interaction of Polysaccharides with Silver Hill Illite. Clays Clay Miner. USA.

- Huang, J. Kogbara, R. Hariharan, N. Masad, E. Little, D. (2021). A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*. USA.
- Jayanthi, PN. Singh, DN. (2016). Utilization of sustainable materials for soils stabilization: Stare of the art. *Advances in Civil Engineering Materials 2016*. India.
- Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. (1973). *Mecánica de suelos: Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos (Tomo II)*. México D.F.: Limusa.
- Kraemer, C., Pardillo, J., Rocci, S., Romana, M., Sánchez, V. y del Val, M. (2004). *Ingeniería de Carreteras (Vol. 2)*. Mc Graw Hill.
- Lozano-Rivas, W. (2012). Uso del extracto de fique (*Furcraea*) como coadyuvante de coagulación en tratamiento de lixiviados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Vol. 28.
- Mora, S. y Tiusaba, J. (2020). Comportamiento de los polímeros como agente estabilizante en los suelos para la construcción de cimentaciones. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. Universidad Católica de Colombia.
- Moustafa, A. Bazaraa, A. Eldin, A. (1981). *Soil Stabilization by Polymeric Materials. Macromolecular Material and Engineering*.
- MTC. (2014). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. *Manual de Carreteras - Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos: Sección suelos y pavimentos*. Lima, Perú.
- MTC. (2020). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. *Anuario estadístico 2020*. Lima, Perú.
- MTC. (2020). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. *Boletín estadístico 2020 – II Semestre*. Lima, Perú.
- Nesterenko, D. (2018). Desempeño de suelos estabilizados con polímeros en Perú. Tesis para optar el Grado de Máster en Ingeniería Civil con mención en Vial. Universidad de Piura.
- Nweke, OM. Okogbue, CO. (2017). The potential of cement stabilized shale quarry dust for possible use as road foundation material. *International Journal of Geo Engineering 2017*. Nigeria.
- Olano, S. (1999). *Acción Molusquicida de Furcraea Andina*. Tesis para optar el título profesional de Biólogo, Mención en Microbiología y Parasitología. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Olivera, G. Tamariz, A. Castillo, P. Choy, W. (2011). Características de suelo y usos tradicionales de especies vegetales en la Provincia de Huaraz, Ancash, Perú. *Revista ECI-Perú*. Vol. 8.
- Petry, T. Little, D. (2002). Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures – history, practice and future. *Journal of Materials in Civil Engineering 2002*

- Pino, G. (2006). Estado actual de las suculentas en el Perú. Zonas Áridas. Vol. 10.
- Quintana, C. (2010). Adaptaciones de las plantas a la sequía. Nuestra Ciencia. Vol. 12.
- Radhakrishnan, G. Kumar, MA. Raju, GP. (2017) Laboratory evaluation of the effects of 3-chloride compounds on the geotechnical properties of an expansive subgrade soil. Journal of The Institution of Engineers. India.
- Ravines, M. (2010). Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelos para carreteras. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. Universidad de Piura.
- Reginatto, A. (1970). "Predicción de la Susceptibilidad al Colapso". 2º Reunión Argentina de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Córdoba, Argentina.
- Reginatto, A. y Ferrero, J. (1973). "Collapse Potential of Soils and Soil Water Chemistry". Proc. of the 8º International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscu, URSS.
- Soltani, A. Deng, A. Taheri, A. Mirzababaei, M. (2017). A Sulphonated Oil for Stabilization of Expansive Soils. International Journal of Pavement Engineering. Australia.
- Soltani, A. Deng, A. Taheri, A. Mirzababaei, M. (2018). Rubber Powder-Polymer Combined Stabilization of South Australian Expansive Soils. Geosynthetics International. Australia.
- Steinberg M. (2000). Expansive Soils and the Geomembrane Remedy. Geodenver 2000. ASCE.
- Tran, TD. Cui, YJ. Tang, AM. Audiguier, M. Cojean, R. (2014). Effects of lime treatment on the microstructure and hydraulic conductivity of Hericourt clay. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 2014.
- Vargas, J. Heredia, E. Bariola, J. Mehta, P. (1986). Preservación de las construcciones de adobe en áreas lluviosas. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Yakimets, I. Paes, S. Wellner, N. Smith, A. Wilson, R. Mitchell, J. (2007). Effect of Water Content On the Structural Reorganization and Elastic Properties of Biopolymer Films: Comparative Study. Biomacromolecules. UK
- Zhao, H. Liu, J. Guo, J. Zhao, C. Gong, B. (2015). Re-examination of lime stabilization mechanisms of expansive clay. Journal of Materials in Civil Engineering 2015. ASCE.
- Zhao, H. Zhao, C. Xiao, Z. Chan, L. (2013). Phsicochemical characterization of cement stabilized highly expansive soil. Geo-congress 2013: stability and performance of slopes and embankments III. ASCE.