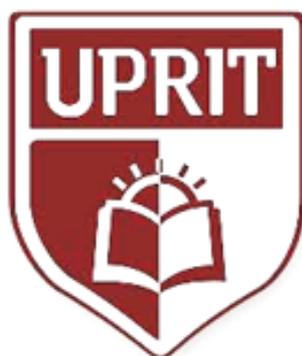


**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TRUJILLO**  
**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**



**BASES TEORICAS PARA REALIZAR EL ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN  
DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS  
PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018**

**TRABAJO DE INVESTIGACION PARA  
OPTAR EL GRADO DE BACHILLER**

**AUTOR:**

**Carlos Martin Camillo Vega**

**TRUJILLO - PERU**

**2019**

## I. INDICE

I. INTRODUCCION.....	5
1.1. Delimitación del problema que motiva el estado del arte.....	6
1.1.1. Campo temático.....	7
1.1.2. Espacio.....	7
1.1.3. Tiempo.....	7
1.2. Formulación del problema.....	8
1.3. Justificación del tema.....	8
1.3.1. Realidad Problemática .....	8
1.3.2. Aspectos diferenciados de justificación .....	10
1.4. Objetivos.....	10
1.4.1. Objetivo General.....	10
1.4.2. Objetivo Específicos.....	10
1.5. Procedimientos metodológicos seguidos.....	10
1.5.1. Técnica de recolección .....	10
1.5.2. Instrumentos de recolección .....	10
1.5.3. Fuentes de información.....	11
II. RESULTADOS RESPECTO A LOS ANTECEDENTES ESTADO DEL ARTE O ESTADO DE LA CUESTION.....	11
2.1. Antecedentes.....	11
2.2. Bases teóricas.....	18
2.2.1. Suelos Cohesivos: Naturaleza y Problemática .....	18
2.2.1.1. Comportamiento de los suelos cohesivos .....	18
2.2.2. Problemas relacionados con los suelos cohesivos .....	22
2.2.3. Técnicas de mejoramiento de suelos .....	24
2.2.3.1. Sustitución .....	25
2.2.3.2. Remoldeo .....	28
2.2.3.3. Pre humedecimiento .....	28
2.2.3.4. Aislamiento o barreras verticales .....	29
2.2.3.5. Sobre excavación .....	29



---

2.2.3.6.	Desplante profundo de la cimentación .....	29
2.2.3.7.	Estabilización Química .....	29
<b>III.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>52</b>
<b>IV.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>53</b>
<b>V.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>55</b>

## II. RESUMEN

La presente monografía busca obtener información técnica necesaria para elaborar una investigación sobre la inclusión de fibras PET en el reforzamiento de suelos cohesivos para terraplenes en obras viales, se pretende comprobar cómo se puede reforzar el suelo mejorando la resistencia y la deformabilidad sin agrietar al suelo, el refuerzo del suelo se debe realizar a través de inclusiones aleatorias de fibras sintéticas discretas (PET), las cuales fueron distribuidas de manera homogénea en la masa de suelo. Previo muestreo, se realizó una caracterización geotécnica y posteriormente fue realizado un ensayo de compactación del tipo Proctor estándar para obtener los parámetros de peso específico seco máximo y contenido de agua óptimo para poder realizar el programa experimental bajo estos parámetros. Se pretende evaluar el desempeño físico-mecánico de las diferentes combinaciones elaboradas de suelo-fibra, mediante los ensayos de capacidad de soporte relativo y pruebas triaxiales, con confinamientos de 0.5 kg/cm<sup>2</sup>, 1.0 kg/cm<sup>2</sup> y 1.5 kg/cm<sup>2</sup>.

La obtención en el proceso de búsqueda de información se realizó tomando en cuenta el Reglamento Nacional de Edificaciones en especial la Norma E-050, se recolectaron datos, utilizando matriz de datos, aplicando fuentes de información primaria, que resulta de suma importancia en la búsqueda del conocimiento necesario para llevar a cabo el estudio en dicha obra vial.

### PALABRAS CLAVES

- Fibras PET.
- Reforzamiento de suelos.
- Suelos cohesivos
- Terraplenes.
- Obras viales.

### III. ABSTRAC

This monograph seeks to obtain technical information necessary to develop an investigation on the inclusion of PET fibers in the reinforcement of cohesive soils for road embankments, it is intended to verify how the soil can be reinforced by improving the strength and deformability without cracking the soil, Soil reinforcement must be carried out through random inclusions of discrete synthetic fibers (PET), which were distributed homogeneously in the soil mass. After sampling, a geotechnical characterization was carried out and a compaction test of the standard Proctor type was carried out to obtain the parameters of maximum dry specific weight and optimum water content to be able to carry out the experimental program under these parameters. The aim is to evaluate the physico-mechanical performance of the different soil-fiber combinations, by means of relative support capacity tests and triaxial tests, with confinements of 0.5 kg / cm<sup>2</sup>, 1.0 kg / cm<sup>2</sup> and 1.5 kg / cm<sup>2</sup>.

The obtaining in the information search process was done taking into account the National Building Regulations especially the E-050 Standard, data were collected, using data matrix, applying primary information sources, which is very important in the search of the knowledge necessary to carry out the study in said road work.

#### KEYWORDS

- PET fibers.
- Reinforcement of soils.
- Cohesive soils
- Embankments.
- Roadworks.



## I. INTRODUCCION

El estudio de las propiedades mecánicas y físicas del suelo, su composición mineralógica y clasificación, son aspectos que al ejecutar una obra civil deben adaptarse a las exigencias que ésta presenta. A través de los años se ha buscado mejorar las propiedades mecánicas y las características resistentes a la compresión y a la tracción de los suelos empleando técnicas como: mallas de acero, inyecciones de concreto, anclajes, fibras naturales, etc. (Gregory, 2006).

En las últimas décadas, el hombre ha desarrollado numerosos métodos para el mejoramiento de suelos que implican la adición de materiales de refuerzo. El refuerzo de suelos tiene como principal propósito incrementar la estabilidad, aumentar la capacidad de carga y reducir los asentamientos del suelo reforzado. Si bien el refuerzo de suelos mediante la adición de fibras es una técnica antigua (un ejemplo de ello es el adobe), su estudio ha adquirido interés recién en los últimos 20 años. Para cumplir con el fin de mejoramiento se ha recurrido al uso de materiales artificiales provenientes de los polímeros, se pueden encontrar las mallas sintéticas, los geotextiles y geogrillas, fabricadas con materia prima proveniente del plástico (C. Fernández Calvo, 2006). Teniendo en cuenta que el plástico es un material reciclable, de los residuos producidos por las empresas se podría dar uso a estos para generar nuevas alternativas para el refuerzo del suelo dando una solución a los problemas de estabilidad de taludes, construcción de terraplenes, mejora de las características de los suelos y problemas ambientales. (Arriaga Vásquez, 2006)

Diversos investigadores han estudiado en los últimos años el comportamiento de suelos reforzados mediante la adición de fibras. En general, los diferentes estudios concuerdan en que la resistencia al corte se incrementa al introducir fibras a la matriz de suelo. Sin embargo, no existe acuerdo respecto al efecto que la adición de fibras produce en la rigidez

---

del suelo reforzado. Las diferencias en las conclusiones a las que arriban las diferentes investigaciones pueden ser explicadas por las numerosas variables involucradas en el estudio del suelo reforzado con fibras, y por los diferentes enfoques con que los estudios han sido conducidos. (Paula V. Vettorelo y Juan J. Clariá, 2014)

Son escasos los estudios realizados sobre suelos cohesivos reforzados con fibras. Entre ellos vale mencionar la investigación liderada en Turquía, por Akbulut et al. (2007). En este país se estudió el efecto que fibras sintéticas de polipropileno y polietileno tienen en el comportamiento de un suelo arcilloso. Se observó un claro aumento en los parámetros de resistencia al corte, siendo más notorio este incremento en el suelo reforzado con fibras de polipropileno.

### **1.1. Delimitación del problema que motiva el estado del arte**

El análisis de las Bases Teóricas de la Inclusión de fibras PET en el reforzamiento de suelos cohesivos para terraplenes en obras viales, esta investigación se centra el estudio de nuevas alternativas técnicas para viabilizar el uso de suelos cohesivos en la construcción de terraplenes de obras viales. Esto mediante el mejoramiento de sus propiedades mecánicas del suelo a través de la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET) como material de refuerzo, realizando estudios experimentales en laboratorio con diferentes longitudes y porcentajes de adición de fibras PET, para luego evaluar matemáticamente con software especializado el desempeño de los terraplenes reforzados; asegurando la estabilidad, resistencia y deformabilidad sin agrietarse de la estructura terrea conformada, evitando así que se recurra al uso de material de préstamo, lo cual deriva en una sobreexplotación de recursos naturales.

Actualmente comienza a generarse una conciencia global acerca de la contaminación del planeta y del manejo coherente de los recursos. Conforme el tiempo avanza, cada vez se vuelve más difícil la obtención de



ciertos minerales así como de ciertas materias primas, lo que ha incentivado a los investigadores alrededor del mundo a la búsqueda de materiales alternativos, al reciclaje de materiales de desperdicio así como a la búsqueda de nuevos campos de aplicación de materiales renovables ya existentes.

Por otro lado, a través de los años se ha buscado mejorar las propiedades mecánicas y las características resistentes a la compresión, deformación y estabilidad de los suelos cohesivos, empleando técnicas como: mallas de acero, inyecciones de concreto, anclajes, fibras naturales, etc. En las últimas décadas, para cumplir con el mismo fin se ha recurrido al uso de materiales sintéticos provenientes de los polímeros como son las mallas sintéticas, los geotextiles y geogrillas, fabricadas con materia prima proveniente del plástico. Teniendo en cuenta que el plástico es un material reciclable, de los residuos producidos por la población y las industrias, se podría dar uso a estos para generar nuevas alternativas para el refuerzo del suelo que dé solución a los problemas de estabilidad de taludes, construcción de terraplenes, mejora de las características de los suelos cohesivos y problemas ambientales.

### **1.1.1. Campo Temático**

- Geotecnia.

### **1.1.2. Espacio**

Kilómetro 52 de la carretera Trujillo-Otuzco, a la altura del sector Plazapampa.

Distrito : Otuzco.

Provincia : Otuzco

Región : La Libertad

### **1.1.3. Tiempo**

Septiembre de 2018.

---

## 1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA

¿Cuál son las Bases Teóricas que permitirán realizar la inclusión de fibras PET en el reforzamiento de suelos cohesivos para terraplenes de obras viales, La Libertad 2018?

## 1.3. Justificación del Tema

### 1.3.1. Realidad Problemática

En el Perú se cuenta con una gran diversidad de tipologías terrestres, la cual es un factor determinante en la construcción de obras viales, además, dependiendo del lugar del proyecto es posible que no se cuenten con canteras de material granular para poder realizar las mejoras necesarias en caso se tenga un suelo cohesivo, para solucionar este problema, según el MTC, se deben emplear alternativas de estabilización y reforzamiento para el mejoramiento de las características mecánicas del material evitando elevados costos de obra por los grandes espesores de pavimento a ser proyectados y en el caso de terraplenes: por el consumo y desecho excesivo de materia prima (incrementándose costos por movimiento de tierras); es así que se hace de interés nacional investigar nuevas metodologías de mejoramiento de suelos para la construcción de obras viales en caso se encuentra en una zona de suelos con bajas prestaciones ingenieriles. (López Ortiz, 2006)

Por otro lado, en la actualidad es difícil prescindir de los plásticos, no sólo por su utilidad sino también por la importancia económica que tienen. Esto se refleja en los índices de crecimiento de esta industria que, desde principios del siglo pasado, supera a casi todas las actividades industriales. En el Perú, se producen unas 3 500 millones de botellas de plástico cada año, de las cuales, menos del 50 % son recicladas, según datos de la ONG Ciudad Saludable (2016); que el porcentaje de

reciclaje sea tan pequeño es un grave problema porque la contaminación causada por el uso de materiales descartables que no pueden ser reutilizados es una de las mayores fuentes de gases de efecto invernadero. En el Perú existen más de 100 mil recicladores pero su actividad está limitada por no haber un mercado de reúso de PET, esto debido a políticas restrictivas e informalidad (ONG Ciudad Saludable, 2016). Es por esto que se hace imperativo la necesidad de investigar nuevos métodos de reutilización de plásticos PET, a través de sus diversas formas de reciclaje como lo es su conversión a fibras de PET; las cuales pueden tener un alto valor de uso para la industria de la construcción.

### 1.3.2. Aspectos diferenciados de justificación

- La búsqueda de información general, permitirá establecer un estudio de inclusión de fibras en el mejoramiento de suelos para carreteras con la finalidad de obtener mejor resistencia y deformabilidad.
- Asimismo, las bases teóricas, buscan aperturar nuevas soluciones al problema de los aspectos mecánicos que el suelo en su estado natural no tendría, ya que, al ser introducidas de una manera aleatoria en el suelo, generarán un aumento en la resistencia del mismo, obteniendo así un terreno más apto para la construcción de terraplenes en obras viales.
- Los alcances de referencias técnicas, permitirán realizar un análisis que incidan en **aspectos concluyentes en la recopilación de información**, cómo la optimización, relación y secuencias de la información obtenida.
- Desde la perspectiva de otorgar **soluciones basadas en la obtención de información valorativa, se pretende demostrar**

---

que la búsqueda de información geotécnica, corresponde al sustento que generan soluciones técnicas y normativas del mejoramiento de suelo en terraplenes para obras viales.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Redactar bases teóricas para analizar la inclusión de fibras PET en el reforzamiento de suelos cohesivos para terraplenes de obras viales, La Libertad

### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Definir información sobre la Suelos Cohesivos, naturaleza y problemática.
- Identificar y evaluar los métodos y técnicas de mejoramiento de suelos.
- Revisar información sobre suelos fibro reforzados.
- Investigar sobre el Polietileno Tereftalato (PET)

## **1.5. PROCEDIMIENTOS METODOLIGOS SEGUIDOS**

### **1.5.1. Técnica de recolección**

- Revisión documental y análisis al contenido de la búsqueda de información, clasificación y selección de información de Bases Teóricas, con la consiguiente toma de lectura de las condiciones, procesos y consecuencias observables, servirán de aporte importante a una solución al problema detectado.

### **1.5.2. Instrumentos de recolección**

Representa el modo y forma que utiliza el investigador para recolectar la información adecuada para su tema, utilizando matriz de análisis de datos:

- Ver Anexo 01°, Anexo N° 02.

### 1.5.3. Fuentes de Información

Corresponde a los instrumentos diferenciados para la toma de conocimientos, búsqueda y acceso a información necesaria.

- **Fuente de datos primaria:**

- Norma E.050 Suelos y Cimentaciones.
- Investigaciones de artículos científicos en revistas indexadas acerca de técnicas de mejoramiento de suelos.
- Tesis acerca de mejoramiento de suelos con la inclusión de tratamiento para obtener mejores propiedades del suelo.

## II. RESULTADOS RESPECTO A LOS ANTECEDENTES ESTADO DEL ARTE O ESTADO DE LA CUESTION

### 2.1. ANTECEDENTES

#### “ESTUDIO DEL USO DE POLIETILENO TEREFALATO COMO MATERIAL DE REFUERZO DE ESTRUCTURAS TÉRREAS CONFORMADAS POR SUELOS COHESIVOS”

AUTOR: (Almanza A., 2015). OBJETIVO: Utilizar fibras de polietileno tereftalato reciclado para el mejoramiento de suelos arcillosos con alto índice de plasticidad y aplicarlo en bordos para protección de ríos. METODOLOGÍA: Para lograr el objetivo de la investigación se hizo necesaria la caracterización geotécnica del suelo cohesivo, para luego encontrar el mezclado óptimo a diferentes porcentajes de adición entre el suelo y las fibras PET de 50 mm, a continuación, se hacen los ensayos de resistencia y desempeño, para finalmente, con los parámetros geotécnicos determinados, se modele numéricamente los terraplenes conformados por el suelo reforzado con fibras. RESULTADO: El reforzamiento de suelos

---

cohesivos con fibras PET incrementa el ángulo de fricción y disminuye la cohesión, sin embargo, en el análisis de estabilidad y deformación del terraplén con suelo reforzado, se cumple con los parámetros de seguridad. **CONCLUSIÓN:** El reforzamiento de suelos con fibras de PET recicladas presenta una mejora bastante considerable, por lo cual el suelo reforzado permite que el bordo se adapte de manera continua a la deformación del suelo en el cual se desplanta sin sufrir agrietamiento y de esta manera reducir el riesgo de tubificación y falla.

**APORTE:** La metodología sustentada es de gran utilidad para poder lograr un mezclado óptimo entre las fibras PET y el suelo a reforzar. Del mismo modo, permite tener una visualización más precisa del efecto que tiene el uso de suelo reforzado con fibras en estructuras térreas, siendo los porcentajes 0.6% y 1.0% los que reflejan un mejor resultado.

**“MEJORAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS”**

**AUTOR:** (Rosales H., 2014). **OBJETIVO:** Utilizar fibras de polipropileno para el mejoramiento de suelos arcillosos expansivos. **METODOLOGÍA:** Para lograr el objetivo de la investigación se hizo necesaria la caracterización geotécnica del suelo arcilloso expansivo obtenido de una zona de riesgo en México, para luego encontrar el mezclado óptimo a diferentes porcentajes de adición entre el suelo y las fibras de polipropileno de 20 mm, a continuación, se hacen los ensayos de resistencia y ensayos de cambio volumétrico, para finalmente, realizar una comparación entre los suelos con y sin refuerzo. **RESULTADO:** La dosificación de la fibra desempeña un papel importante en la resistencia a la compresión no confinada del composite, obteniéndose un mejor desempeño en general con mayores dosificaciones de fibra y que a pesar de que la longitud de la fibra no es una variable estadísticamente significativa en la obtención de mejores resultados, si lo es en el proceso de mezclado, teniéndose un mejor mezclado al ir disminuyendo la longitud de la fibra. Además, La inclusión

---

de las fibras genera un comportamiento más dúctil ante pruebas de tensión en comparación al suelo sin refuerzo, el cual presenta una falla frágil. **CONCLUSIÓN:** La inclusión de fibras en el suelo presenta mejoras en varios parámetros de resistencia mecánica, de mayor y menor magnitud dependiendo del ensayo, pero se puede considerar al fibro reforzamiento como una técnica competente y con ventajas técnicas.

**APORTE:** Los resultados verifican que las adiciones de fibras sintéticas a base de polímeros mejoran considerablemente las propiedades de los suelos de bajas prestaciones ingenieriles, teniendo como parámetros de control: el tamaño de la fibra a utilizar y la cantidad de adición (no mayor a 2%, según recomendación de la tesis señalada).

**“SUELOS ARCILLOSOS REFORZADOS CON MATERIALES DE PLÁSTICO RECICLADO (PET)”**

**AUTOR:** (López Ortiz, 2015). **OBJETIVO:** Analizar el cambio a la resistencia al corte de un suelo arcilloso cuando se adicionan fibras de materiales de plástico reciclado. **METODOLOGÍA:** Para lograr el objetivo de la investigación se hizo necesaria la caracterización geotécnica del suelo arcilloso, luego se elaboran manualmente las fibras de PET a partir de botellas recicladas, a continuación, se realiza el mezclado suelo- fibras PET de 30 mm y 50 mm a diferentes porcentajes. Finalmente se realizan ensayos de resistencia y desempeño. **RESULTADO:** Se observan mayores esfuerzos con fibras de longitud corta a mayor contenido de fibra, esto puede ser debido a que las longitudes largas con mayor contenido de fibra no se dejan moldear y se desmoronan fácilmente, generando poca adherencia entre las partículas del suelo. Con las fibras de mayor longitud se observa que la cohesión varía muy poco entre los porcentajes contenidos de fibra, mientras que en las de menor longitud la variación es notable con porcentajes más altos de fibra. Esto podría indicar que a menor longitud y mayor porcentaje puede existir una mejor homogenización de la mezcla generando mejor consistencia y mayores esfuerzos de resistencia.

---

**CONCLUSIÓN:** La cohesión como parámetro de medida a la resistencia al corte presenta un aumento en su valor, demostrando que las fibras de plástico reciclado pueden mejorar las propiedades mecánicas del suelo. Al observar que la adición de fibra de plástico reciclado mejora las propiedades del suelo, también puede disminuir el impacto ambiental sacando provecho de los residuos de la industria del plástico.

**APORTE:** Con la presente tesis se demuestra que a medida que la cantidad de porcentaje de fibra aumenta la resistencia del suelo también aumenta al igual que la deformación, por tal razón los esfuerzos a cortante son mayores y la ductilidad crece. Además, para la aplicación en proyectos de ingeniería se puede tener en cuenta que los suelos pueden ser reforzados con plástico reciclado, para mejorar las propiedades mecánicas de suelos arcillosos, con porcentajes ideales entre 0.2 y 2.0%.

**“EFECTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO MEDIANTE EL USO DE FIBRAS ARTIFICIALES”**

**AUTOR:** (Fresneda et al., 2014). **OBJETIVO:** Utilizar las fibras de polipropileno como técnica de reforzamiento para un suelo superficial característico de los depósitos coluviales del Valle de Aburrá. **METODOLOGÍA:** Para la realización de los diferentes ensayos se realizaron apiques de 80 cm de profundidad y se recolectaron muestras alteradas en bolsa y muestras inalteradas en tubo shelby. Las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Geotecnia y Pavimentos de la Facultad de Minas, para la ejecución de dichos ensayos. Se realizaron ensayos con el fin de hacer una caracterización física y mecánica del suelo en estado natural; y ensayos que permitieran determinar el aporte de las fibras en el comportamiento del suelo ante diferentes eventos de distribución de esfuerzos. Para el suelo reforzado con fibras se analizará el comportamiento ante la aplicación de esfuerzos axiales en condiciones confinada y confinada mediante el ensayo de Compresión simple y el índice de CBR respectivamente, las pruebas proporcionan la información

necesaria para llevar a cabo la comparación entre el suelo en estado natural y reforzado en las condiciones ya mencionadas. RESULTADO: Los resultados de esta investigación muestran una mayor capacidad de deformación al contener las fibras sintéticas, en estas condiciones el suelo alcanzó aproximadamente un aumento del 45% con respecto al suelo sin reforzar. Los resultados obtenidos en los ensayos para la determinación del Índice de CBR mostraron que las fibras no aportaron resistencias adicionales al ser incorporadas al suelo, situación que se atribuye a la poca adherencia entre las fibras laminares de textura lisa y el suelo. CONCLUSIÓN: La implementación de fibras de forma ondulada o que tengan una textura corrugada pueden favorecer la adherencia del material con el suelo, y por lo tanto ofrecer mayor resistencia a la tracción.

APORTE: En la presente investigación se verifica que las fibras no aportaron resistencias adicionales al ser incorporadas al suelo, situación que se atribuye a la poca adherencia entre las fibras laminares de textura lisa y el suelo, esta falta de adherencia no permite que se genere resistencia a la tracción. Por lo que se intuye que fibras más finas se distribuirían mejor en el suelo y podrían permitir que se presente mayor adhesión.

#### **“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE REFUERZO DE SUELOS CON FIBRAS SINTÉTICAS”**

AUTOR: (C. Fernández Calvo, 2012) OBJETIVO: Realizar ensayos de laboratorio que confirmen la mejora de los parámetros geotécnicos mediante la adición de fibras sintéticas, dadas las dudas y disparidad de conclusiones de algunos artículos analizados, con vistas a su aplicabilidad a los suelos de Castilla y León, México. METODOLOGÍA: Para la preparación previa al mezclado de las fibras ha sido necesario un desmenuzamiento y esponjamiento manual muy minucioso, dado que las fibras se presentan en haces difíciles de separar. Posteriormente se ha efectuado el mezclado manual con el suelo. La proporción de la mezcla ha sido un 0,2% en peso de fibra respecto del suelo. Este valor es el

recomendado en la información técnica analizada por el Comité de Geotecnia Vial - México, como la proporción más interesante, tanto bajo el punto de vista económico como de mejora de las propiedades geotécnicas. Se han empleado seis tipos de fibras. Luego se procedió a realizar las pruebas de compresión triaxial estática a las muestras de los suelos reforzado. **RESULTADO:** Los valores de Proctor Normal no presentan variaciones significativas en relación al tratamiento con fibras. Las variaciones detectadas en la densidad son mínimas, mientras que las obtenidas por las humedades entran dentro del mismo rango para este tipo de suelo. En cuanto a los cortes directos, en general se observa que la cohesión refleja ligeras disminuciones, con aumentos del ángulo de rozamiento interno que, en general, crece con la mayor longitud de las fibras empleada en la mezcla. En los triaxiales efectuados en los tratamientos con fibras de mayor longitud se aprecia un aumento de la cohesión y muy ligero del ángulo de rozamiento interno. Los tratamientos con fibras no muestran diferencias significativas, salvo con las fibras más largas (> 40mm) en la zona del lado seco respecto de la humedad óptima, donde los aumentos son en general superiores al 50%. Por otro lado, la forma de rotura experimenta una variación al prolongarse notablemente el estado plástico, al igual que ocurre en el otro tipo de suelo estudiado. **CONCLUSIÓN:** La mejora de las propiedades geotécnicas por incorporación de fibras textiles sintéticas observada en los ensayos efectuados, es tanto mayor cuanto peor sea el suelo, y cuanto más largas sean las fibras utilizadas. Por la dificultad de mezclado, es recomendable la realización de tramos experimentales in situ con un control a base de ensayos a mayor escala que los de laboratorio.

**APORTE:** Con la presente investigación se verifica que en diferentes tipos de suelos, la inclusión de fibras sintéticas poliméricas tienen un impacto positivo en la mejora de sus propiedades geotécnicas. Así mismo, la proporción entre las mejoras alcanzadas y el tamaño de la fibra son directamente proporcionales, sin embargo, hay que tener en cuenta la

---

dificultad de mezclado cuando se utilizan fibras con una longitud alta, por lo que se recomiendan fibras con un tamaño máximo de 120 mm.

**“SUELOS REFORZADOS CON FIBRAS: ESTADO DEL ARTE Y APLICACIONES”**

**AUTOR:** (Li C., 2005) **OBJETIVO:** Revisar y analizar la bibliografía existente sobre el refuerzo de suelos mediante la adición de fibras. Para vislumbrar el mecanismo de interacción entre las fibras y el suelo, y cómo éste modifica los parámetros de resistencia al corte y rigidez del suelo reforzado. **METODOLOGÍA:** Para lograr el objetivo de la investigación se empieza realizando la revisión bibliográfica sobre el refuerzo de suelos mediante la adición de fibras. Se analizan los tipos y contenidos usuales de fibras empleados tanto en suelos granulares como cohesivos. Asimismo, se describen algunos modelos predictivos desarrollados en la literatura. Se discuten los diferentes enfoques existentes en la bibliografía para abordar el tema. **RESULTADO:** Los diferentes estudios concuerdan en que la resistencia al corte se incrementa al introducir fibras a la matriz de suelo. Sin embargo, no existe acuerdo respecto al efecto que la adición de fibras produce en la rigidez del suelo reforzado. Las diferencias en las conclusiones a las que arriban las diferentes investigaciones pueden ser explicadas por las numerosas variables involucradas en el estudio del suelo reforzado con fibras, y por los diferentes enfoques con que los estudios han sido conducidos. **CONCLUSIÓN:** La incorporación de fibras aumenta la resistencia al corte principalmente a grandes deformaciones y le brinda mayor ductilidad tanto a suelos granulares como cohesivos. Son muchas las potenciales aplicaciones del suelo reforzado con fibras. Sin embargo, se requiere de estudios de campo más profundos y mayor experiencia basada en el uso de la técnica para cuantificar con mayor confianza el efecto de las fibras en el comportamiento del suelo reforzado.

---

APORTE: La presente investigación aporta con una base teórica que da a conocer que la adición de diferentes tipos de fibras sintéticas al suelo aumenta la resistencia al corte a grandes niveles de deformación. Por lo cual se avala su uso en el mejoramiento de suelos tanto cohesivos como granulares, así mismo, en la construcción de estructuras terreas y como estabilizador de taludes, al hacer un estudio de casos aplicativos de éxito.

## **2.2. BASES TEORICAS**

### **2.2.1 SUELOS COHESIVOS, NATURALEZA Y PROBLEMÁTICA.**

#### **2.2.1.1 Comportamiento de los suelos cohesivos.**

Los factores medioambientales del área en la que se sitúen los suelos cohesivos juegan un papel importante en el comportamiento de estos mismos. La frecuencia de la lluvia, la tasa de evaporación, así como la profundidad y la actividad de la arcilla, son parámetros importantes en el desarrollo de las propiedades ingenieriles del suelo. (Juárez Badillo, 2007)

El daño en las estructuras terreas es causado principalmente por deformaciones y expansiones internas en el suelo cohesivo conformante. La expansión diferencial en los suelos cohesivos está en función de numerosas variables, tales como, el espesor del estrato arcilloso, variaciones en el contenido de agua debajo de la estructura, la heterogeneidad del estrato y otras causas más relacionadas con el uso de la estructura en particular. También pueden ser causados por cambios en las situaciones locales, tales como los rompimientos de drenaje o tubería de agua potable, el regado de jardines y también el diseño pobre en el drenaje superficial (Gromko, 1974).

---

El mineral arcilloso juega un papel importante en la determinación de la expansión en suelos cohesivos. De los tres tipos principales de minerales arcillosos –illita, kaolinita, montmorillonita- la última posee la característica de expandir más que las otras. El potencial de expandir del mineral depende de la estructura cristalina de la hoja, la estructura del conjunto de hojas, y la capacidad de cambio de cationes del mineral.

Las partículas de la arcilla son muy pequeñas y su forma está determinada por el arreglo de capas delgadas de láminas cristalinas, junto con otros elementos que pueden ser incorporados en la estructura del mineral de arcilla (hidrógeno, sodio, calcio, magnesio, azufre). La presencia y abundancia de estos iones disueltos puede tener un gran impacto en el comportamiento de los minerales de arcilla. En una arcilla expansiva la estructura molecular y el arreglo de las láminas cristalinas tiene una afinidad particular a atraer y mantener moléculas de agua entre las láminas cristalinas en un enlace fuerte teniendo un efecto como de “sándwich”. A causa de la estructura eléctrica dipolar de las moléculas del agua, tienen una atracción electroquímica a las láminas de arcilla. El mecanismo por el cual estas moléculas se juntan unas con otras se llama adsorción. El mineral arcilloso montmorillonita, que es parte de la familia de las smectitas, puede adsorber grandes cantidades de moléculas de agua entre sus láminas, y por lo tanto tiene un gran potencial de expansión y contracción (Mitchel y Soga, 2005).

Las bajas propiedades ingenieriles del suelo cohesivo dependen de los siguientes factores (Gromko, 1974):

Tipo de mineral y cantidad: El tipo de mineral se puede determinar mediante el microscopio óptico y de electrones, difracción de rayos x, análisis térmico diferencial, análisis infrarrojo, absorción de colorante, y técnicas de análisis químicos. La expansión también depende de ion



---

intercambiable y la estructura laminar. Partículas menores permiten mayor absorción de agua por unidad de volumen de la partícula de arcilla.

Densidad: Las arcillas densas expandirán más cuando se humedezcan, comparadas con la misma arcilla a una menor densidad y con el mismo contenido de agua.

Condiciones de carga: Las sobrecargas estructurales reducirán la expansión a tal grado que se puede inhibir en la presencia de agua. Permitir una pequeña cantidad de expansión reduce ampliamente las presiones de expansión.

Estructura del suelo: La historia de esfuerzos influencia la expansión. Arcillas expansivas inalteradas o cementadas poseen alta resistencia a la deformación y pueden absorber parte de la presión de expansión. Las arcillas remoldeadas expanden más que las anteriores bajo condiciones idénticas. Remoldear arcillas inalteradas reduce la rigidez inicial a alto esfuerzo cortante, y alinea preferencialmente los granos planos en dirección normal a las fuerzas de compactación. Los suelos con partículas alineadas preferencialmente expanden más en dirección normal a las láminas minerales que en dirección paralela.

Tiempo: La transmisión de humedad es lenta y requiere semanas e incluso años para saturarse, esto depende de la permeabilidad y del espesor del estrato.

Fluido en poros: Un alto pH favorece la disociación de cationes. Concentraciones altas de sal en el agua libre pueden causar menos absorción de agua y por lo tanto menor expansión.

---

Contenido de agua: Las arcillas secas expandirán más que sus contrapartes húmedas debido a la relación directa entre el contenido de agua y las presiones de succión.

En general, el rendimiento a largo plazo de cualquier estructura geotécnica depende de la solidez de los suelos subyacentes. Los suelos inestables / expansivos pueden crear problemas importantes para pavimentos o estructuras. El suelo de algodón negro es un suelo expansivo con poca resistencia capacidad cuando se somete a humedad, tiene la capacidad de absorber y disipar agua con cambio subsecuente en el volumen. La construcción de cualquier estructura en este tipo de suelo requiere ya sea la sustitución del suelo por la importación de una mejor extranjera o mediante la adición de productos químicos que mejorará el suelo hacia la propiedad deseada. (Wang, 199)

La construcción exitosa de carreteras requiere la construcción de una estructura que sea capaz de soportar las cargas de tráfico impuestas. Una de las capas más importantes de la carretera es la base real, o subrasante. El suelo de subrasante forma la parte integral del pavimento de la carretera estructura ya que proporciona el soporte al pavimento desde abajo. La función principal de la subrasante es para dar soporte adecuado al pavimento y para esto; la subrasante debería poseen suficiente estabilidad bajo clima adverso y condiciones de carga. Si estas estructuras se basan en suelos con baja capacidad de carga, es probable que fallen durante o después construcción, con o sin aplicación de carga de ruedas sobre ellos. Donde el pavimento sea construido en un suelo inherentemente débil, este material será normalmente eliminado y reemplazado con un material granular más fuerte o mejorando el suelo hacia la propiedad deseada por adición de productos químicos (Christopher, H., 2010).

---

Esta técnica de eliminación y reemplazo puede ser costosa y lenta. Donde los agregados son escasos, el uso de estos recursos no renovables se considera insostenible, particularmente si las distancias de acarreo son significativas.

Una alternativa a la opción de extracción y reemplazo es estabilizar químicamente el material encontrado. Esto elimina la necesidad de reemplazar el material y garantiza las características ingenieriles y mejora el rendimiento del material de acogida para permitir su uso dentro de la estructura del pavimento (Christopher, H., 2010).

### **2.2.2 Problemas relacionados con los suelos cohesivos.**

Los suelos cohesivos generalmente no cumplen con los requerimientos necesarios para un proyecto de terraplenes o pavimentación, debido a su baja capacidad de soporte y mala calidad debido a su naturaleza; este tipo de suelos presentan altas deformaciones e índice de plasticidad, lo que dificulta el trabajo y su uso para construir obras viales. (Rosales H., 2014)

Está bien documentado en la literatura los daños que causan a distintos tipos de estructuras, entre las que se pueden citar: estructuras ligeras, autopistas, vías férreas, aeropistas, canales de agua, tuberías, muros de retención, presas y puentes (Ikizler et al., 2010).

Tan solo en los Estados Unidos, se estima que los daños totales causados por suelos cohesivos tienen un costo anual de \$US15 billones, más del doble que los daños por inundaciones, huracanes, tornados y terremotos combinados. El costo anual de daños por estos suelos en China se estima también en \$US15 billones aproximadamente, mientras que la Asociación de Aseguradores Británicos estiman que el costo promedio anual asociado al daño por suelos cohesivos es cercano a los 400 millones

---

de libras, lo que los convierte en el peligro geológico más dañino en el Reino Unido (Li et al., 2014).

Para el caso de los terraplenes de obras viales, es lógico y sustentable el utilizar el mismo suelo de la zona para su construcción (Almanza A., 2015), sin embargo, es común encontrar suelos cohesivos en los tramos carreteros proyectados, por lo cual para el empleo de estos suelos primero se tiene que utilizar procesos químicos o físicos para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, o en su defecto hacer un reemplazo total del suelo cohesivo, lo cual demanda grandes inversiones económicas y de recursos naturales. (Al-Refeai, 1991).

El suelo expansivo es un problema recurrente en todo el mundo principalmente en regiones áridas. Se han reportado daños causados por estos suelos en regiones tan diversas como África, Australia, Canadá, India, Israel, Rusia, España y los Estados Unidos (Popescu, 1979); Perú no es la excepción y su presencia se ha detectado en numerosos departamentos como San Martín, La Libertad, Lima, Loreto, etc.

En el Perú se cuenta con una gran diversidad de tipologías terrestres, la cual es un factor determinante en la construcción de obras viales, además, dependiendo del lugar del proyecto es posible que no se cuenten con canteras de material granular para poder realizar las mejoras necesarias en caso se tenga un suelo cohesivo, para solucionar este problema, según el MTC, se deben emplear alternativas de estabilización y reforzamiento para el mejoramiento de las características mecánicas del material evitando elevados costos de obra por los grandes espesores de pavimento a ser proyectados y en el caso de terraplenes: por el consumo y desecho excesivo de materia prima (incrementándose costos por movimiento de tierras). En diferentes universidades del país los suelos cohesivos han sido motivo de estudio y se han desarrollado proyectos de investigación con objetivos diversos como lo son la caracterización, el

---

modelado de suelos no saturados, la estabilización y el mejoramiento. (Consoli & Prietto, 1998).

### 2.2.3 TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS.

Se entiende por mejoramiento de suelos al procedimiento mecánico y artificial mediante el cual se busca obtener un material que cumpla con los requerimientos mínimos de resistencia, permeabilidad, expandimiento y estabilidad volumétrica (Zepeda et al., 2004). Debe insistirse en que no es una herramienta ventajosa en todos los casos y, desde luego, no es siempre igualmente ventajosa en las situaciones en que pueda resultar conveniente; por consiguiente, habrá que guardar siempre muy claramente en mente el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación entre lo que se logrará al mejorarlas, el esfuerzo y dinero que en ello habrá de invertirse, también recordar que la técnica de mejoramiento para un tipo de suelo podría perjudicar a otro.

A continuación, se da una breve descripción de las propiedades del suelo más susceptibles a ser mejoradas (Rico y Del Castillo, 1982):

#### **Estabilidad volumétrica:**

Se refiere por lo general a los problemas relacionados por los cambios del contenido de agua del suelo. Se entiende por suelo expansivo como aquel que es susceptible de sufrir cambios volumétricos por cambios de humedad. Puede decirse que los suelos expansivos son un fenómeno que se origina por la presencia de un suelo arcilloso con mineral montmorillonita y un clima semiárido, donde el evo transpiración potencial media anual es mayor que la precipitación media anual (Zepeda et al., 2004). Una gran parte de daños estructurales ha sido atribuida a suelos expansivos.

La estabilización suele ofrecer una alternativa de tratamiento para transformar la masa de la arcilla expansiva por tratamientos químicos o térmicos. La experiencia, muy orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas más profundas. (Villalaz, 2004)

#### **Resistencia:**

Existen varios métodos de estabilización que se han revelado útiles para mejorar la resistencia de muchos suelos. Todos estos métodos parecen perder mucho de su poder en el momento en que se tienen grandes cantidades de materia orgánica. La compactación es una forma de estabilización mecánica a la que se recurre para incrementar la resistencia de los suelos.

### **Permeabilidad:**

No suele ser muy difícil modificar substancialmente la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como la compactación, la inyección, etc. En materiales arcillosos, el uso de defloculantes puede reducir la permeabilidad también significativamente. En términos generales, y eliminando la estabilización mecánica, los métodos de estabilización para influir en la permeabilidad de los suelos suelen estar bastante desligados de los métodos con los que se busca variar la estabilidad volumétrica o la resistencia.

### **Compresibilidad:**

La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos, sin embargo, no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad y, de hecho, puede decirse que todos los métodos de estabilización tienen influencia en dicho concepto.

### **Durabilidad:**

Suelen involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico. No existen tantos criterios de campo o laboratorio que permitan establecer con seguridad cuál va a ser la durabilidad de un suelo estabilizado y éste es un motivo que contribuye a que el concepto durabilidad sea de los más difíciles de analizar, por lo menos cuantitativamente.

A continuación, se describen brevemente algunos de los procedimientos de mejoramiento del terreno (Zepeda et al, 2004):

#### **2.2.3.1 Sustitución.**

Una solución simple y fácil para zapatas y losas de cimentación desplantadas en suelos expansivos consiste en sustituir el suelo de cimentación con suelos no expansivos. La experiencia indica que si el subsuelo está formado por una capa de más de metro y medio de suelos granulares (SC-SP), desplantada sobre suelos altamente expansivos, no hay peligro de movimientos en las cimentaciones cuando la estructura está colocada sobre los suelos granulares. La mecánica y la trayectoria de las aguas superficiales filtradas a través de la capa superior del suelo granular no es clara. Se ha concluido que puede ser que el agua filtrada nunca llega al suelo expansivo o que su expansión es tan uniforme que los movimientos estructurales no se notan. (Rosales Hurtado, 2014).

Por razones económicas, la extensión del relleno seleccionado debe limitarse a un máximo de 3 metros más allá de la línea de construcción. Por lo tanto, la posibilidad de filtraciones por los límites del relleno existe. No se ha establecido ninguna pauta en cuanto al requisito de espesor del relleno seleccionado, sin embargo, se insiste en un mínimo de 1 metro, aunque sería preferible de 1.5 metros. Esta magnitud se refiere al espesor del relleno seleccionado bajo la parte inferior de las zapatas o las losas de cimentación.

Los requisitos pertinentes que se deben considerar para la sustitución del suelo son el tipo de material con el que se hará el relleno, así como la profundidad y la extensión a las que se realizará la sustitución.

### **Tipo de material:**

Evidentemente, el primer requisito para la sustitución de suelos es que este no sea expansivo. Todos los suelos granulares que van de los GW (grava bien graduada) a SC (arena arcillosa) en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos pueden cumplir el requisito de no expansividad. Sin embargo, en suelos tipo GW y SP el agua superficial puede viajar libremente a través del suelo y causar humedecimiento en los suelos expansivos a mayor profundidad. En el otro extremo, los suelos clasificados como SC con un alto porcentaje de arcillas plásticas pueden presentar potencial expansivo.

Aparentemente cualquier relleno seleccionado será satisfactorio mientras no sea expansivo. Sin embargo, las pruebas de expansividad son el único método confiable para determinar la expansividad de un material, los límites solo son indicativos, por consiguiente, en caso de duda, tales pruebas deber realizarse en lugar de confiar solo en el límite líquido.

Se ha dado un gran énfasis a la posibilidad de mezclar los suelos granulares con los suelos expansivos del sitio, lo que reduce la cantidad del material de relleno requerido. Teóricamente, este método es razonable, pero en la práctica es difícil incorporar los suelos granulares con arcillas expansivas secas y duras. Roturadores y aradores serán necesarios para romper la arcilla en terrones de tamaño razonables, lo cual probablemente lo volverá un método tan caro como los métodos de estabilización química.

### **Profundidad de la sustitución:**

La profundidad de influencia es una cuestión más complicada que debe ser respondida cuando se lidia con el tratamiento del suelo debajo de las cimentaciones. ¿A qué profundidad debe ser compactado el suelo natural?, ¿Cuántos metros cúbicos del material de sustitución deben ser requeridos? Estas preguntas no pueden ser inteligentemente respondidas hasta que la cantidad de movimiento que pueda ocurrir bajo las cimentaciones pueda ser determinada.

En teoría la cantidad de expansión puede ser evaluada de datos derivados de las pruebas de expansión y de los métodos de distribución de presiones, aunque ya se ha concluido que las expansiones reales en campo son de solo un tercio de las estimadas de los resultados de las pruebas de laboratorio (Gizieski y Lee, 1965).

También se puede señalar lo siguiente:

El potencial de expansión vertical de una masa de suelo bajo condiciones de saturación uniforme, puede ser menor a aquél de la misma masa de suelo solo bajo saturación local. El humedecimiento uniforme tiende a igualar el levantamiento.

1. Definitivamente hay una ganancia en cimentar la estructura sobre una capa de suelos no expansivos. Incluso si el suelo más profundo se expande, el movimiento será más uniforme y consecuentemente más tolerable.
2. La profundidad del relleno seleccionado no deberá ser menor a 1 m y preferiblemente a 1.2 m. Se debe remarcar que con 1.2 m de relleno más el peso del concreto, una presión uniforme de aproximadamente 3 t/m<sup>2</sup> es aplicada a la superficie del suelos expansivo. Para suelos moderadamente expansivos, tal sobrecarga puede ser importante en prevenir la presión de expansión.
3. La falla del método de sustitución generalmente ocurre durante la construcción. Si la excavación se moja excesivamente antes de la colocación del relleno el agua atrapada causará expansión. El ingeniero geotecnista debe tener la oportunidad de supervisar la colocación del relleno o tal método no se debe adoptar.
4. El espesor del relleno puede ser reducido si se combina la compactación del suelo original y el método de sustitución.
5. El grado de compactación del relleno seleccionado depende del tipo de estructura a soportar. Para losas de cimentación el 90% de la prueba Proctor estándar debería ser adecuado. Para zapatas un grado de compactación del 95% al 100% debe ser alcanzado (Chen, 1975).

### **Extensión de la sustitución:**

La principal razón por la que el relleno artificial seleccionado es menos efectivo que una capa natural de suelo granular es que en condiciones naturales, la capa se extiende sobre un área larga, mucho más larga que en la condición artificial. En una situación de relleno artificial, siempre es posible que el agua superficial se infiltre a los estratos más profundos de suelos expansivos por los

bordes del mismo. Por lo tanto, entre más área de extensión, más efectivo el relleno.

La sustitución del suelo se puede considerar como el mejor método para obtener un suelo para cimentación apto. Las siguientes son algunas consideraciones que deben ser consideradas como incentivos o requisitos al optar por el método de sustitución de suelos (Chen, 1975):

El costo de la sustitución del suelo es relativamente barato comparado con la estabilización química, además de que no se requiere maquinaria de construcción especial.

- a) La capa de suelo granular también sirve como una barrera efectiva contra la ascensión capilar del suelo.
- b) El drenaje superficial alrededor del edificio debe ser mantenido propiamente para que el agua no tenga oportunidad de llegar a los suelos expansivos debajo del relleno seleccionado.

### **Impermeabilización.**

Se trata de utilizar recubrimientos plásticos o asfálticos entre la cimentación y el suelo para impedir el aumento del contenido de agua del terreno de apoyo, en general es difícil asegurar que el terreno permanecerá realmente protegido (Trejo, 1986).

### **2.2.3.2 Remoldeo.**

Este método consiste en remoldear cierto espesor de suelo (romper su estructura) y volverlo a colocar compactado con un contenido de agua mayor que el original y con un peso volumétrico menor que el que tenía en su estado original. El sobresaturar el suelo podría traer como consecuencia cambios importantes que afectarían sus propiedades mecánicas disminuyéndolas (Romero-Cervantes y Pérez-Rea, 2008).

### **2.2.3.3 Pre humedecimiento.**

El pre humedecimiento del suelo por medio de la técnica de la inundación se ha utilizado algunas veces para minimizar el cambio volumétrico del suelo, su objetivo es tratar de aumentar el contenido de agua del suelo hasta el valor representativo de la condición de equilibrio. Una vez que se concluye la obra, debe hacerse notar que este tratamiento no es eficaz si el suelo de cimentación está sujeto al secado y humedecimiento repetidos. Además, cuando se utilice este método se recomienda que se lleve a cabo un análisis previo del grado de saturación logrado para prevenir principalmente asentamientos. De la misma manera, este método genera una disminución de

la resistencia al esfuerzo cortante lo que sobre eleva los costos en la cimentación.

#### **2.2.3.4 Aislamiento o barreras verticales.**

Consiste en aislar el terreno de pérdidas o aumentos de humedad, esto se logra mediante la construcción de banquetas, pavimentos, drenaje y barreras. Las banquetas se construirán en el perímetro de las estructuras, las cuales deben tener el ancho de una vez y media la profundidad de la capa activa, debe asegurarse que las banquetas no se agrieten para que no se permita el paso de agua. También pueden ser utilizadas las geomembranas impermeables a manera de cajeo.

#### **2.2.3.5 Sobre excavación.**

Este método consiste en sobre excavar la sección de trabajo en la cimentación y en rellenar el espacio generado con material inerte en cantidad suficiente como para impedir la expansión por el peso del relleno y la estructura. La utilidad del método depende de la presión de expansión del suelo.

#### **2.2.3.6 Desplante profundo de la cimentación.**

La influencia atmosférica sobre la deformación del subsuelo disminuye gradualmente con el aumento de la profundidad, la cimentación se puede desplantar hasta el nivel en el que el cambio de humedad sea imperceptible. Esta profundidad de desplante generalmente es de 1.2 a 1.5 m.

#### **2.2.3.7 Estabilización química.**

Se realiza generalmente con el fin de obtener una de las siguientes mejoras del suelo:

- Aumento de la resistencia y la durabilidad.
- Impermeabilización del suelo.
- Disminución del potencial de cambio de volumen del suelo debido a una contracción o una expansión.

#### **Manejabilidad del suelo.**

Entre los aditivos que pueden utilizarse se incluyen el cemento, la cal, los materiales bituminosos, etc. Las sales han sido estudiadas, con fines de estabilización, desde hace varias décadas, entre las que se pueden citar el cloruro de potasio, el cloruro de magnesio, cloruro de bario, nitrato de sodio, carbonato de sodio, cloruro de calcio, cloruro de sodio, entre otros, sin embargo, solo algunas de ellas, por razones económicas, han podido ser

aplicadas a la estabilización de terracerías. Particularmente, el cloruro de sodio por su bajo costo, es de los que más se han empleado en carreteras, en algunos casos con mayor o menor éxito dependiendo de las condiciones particulares del caso que se trate (Garnica et al, 2002).

Existen otros métodos como la estabilización del suelo con cal, la cual reduce drásticamente el índice plástico y aumenta el límite de contracción de las arcillas montmorillonita (Holtz, 1969), estabilidad por drenaje, por medios eléctricos (como electroósmosis y pilotes electro metálicos), por calor y calcinamiento, por mencionar algunos.

### **Compactación.**

La compactación del suelo es el proceso mediante el cual el suelo es mecánicamente comprimido a través de una reducción de su relación de vacíos. Se mide en términos de la densidad en seco o la cantidad de materia sólida por unidad de volumen. Para una cantidad constante de compactación, todos los suelos tienen un contenido de humedad óptimo y un peso específico seco máximo. En el campo, la compactación se realiza con diferentes tipos de rodillos o vibradores. Uno de los principales laboratorios británicos recomienda el uso de vibro-compactadores de rodillo liso para compactación de suelos granulares, para compactación de suelos arcillosos húmedos los compactadores neumáticos de repetición y para los suelos secos arcillosos los rodillos tipo pata de cabra.

### **Drenajes verticales.**

La aplicación de drenajes prefabricados verticales combinados con vacío y la precarga es considerada como una de las técnicas más respetuosas del medio ambiente dentro de los métodos de mejoramiento de suelo. La presión atmosférica natural se utiliza para generar la succión a través de una bomba de vacío. En comparación con otros métodos de mejoramiento de suelo tales como los pilotes profundos, este método no sólo ahorra un gasto sustancial en el mantenimiento de carreteras y terraplenes de ferrocarril, sino que también aumenta la velocidad de la construcción de carreteras costeras y vías de ferrocarril, así como su capacidad para resistir una mayor carga por tráfico. Además, como el método no requiere productos químicos, el suelo y la química de las aguas subterráneas no van a cambiar, a diferencia de los métodos de mejoramiento donde se utiliza cemento o cal. Este método también reduce el impacto sobre el medio ambiente, reduciendo al mínimo las emisiones de gases de efecto invernadero y la necesidad de la explotación de canteras de arena natural y la grava (Indraratna et al., 2010).

## MÉTODO PARA EL MEJORAMIENTO DEL SUELO EN CAMPO.

Existen varios métodos para mejorar el suelo, a continuación, se mencionan los más comunes: (Ranjan, Vasan, & Charan, 1996).

### Compactación superficial.

Es el proceso mecánico por el cual se busca mejorar las propiedades mecánicas de los suelos (resistencia, compresibilidad, permeabilidad) y sus características.

Existen varios aspectos que afectan el proceso de compactación:

- Naturaleza del suelo
- Método de compactación
- Energía específica
- Contenido de agua del suelo
- Contenido de agua inicial del suelo
- Recompactación
- Temperatura
- Granulometría
- Forma de las partículas

Los procesos de compactación en campo son:

- Por impacto: Rodillo apisonador (Tamper) y pisón
- Por presión: Rodillo liso y neumático
- Por amasado: Rodillo pata de cabra
- Por vibración: Rodillo y placas vibratorias
- Por métodos mixtos: Combinación de los anteriores

Los métodos de compactación en laboratorio son:

- Por impacto: Prueba Proctor (AASHTO) estándar y modificada
- Por carga estática: Prueba Porter
- Por amasado: Prueba Harvard miniatura
- Por vibración: Mesa vibradora

Se hace mención del tipo de pruebas en laboratorio ya que para la elaboración de probetas se usará la prueba Proctor modificada.

### Estabilización de suelos con mezclas.

La estabilización de suelos con mezclas depende de:

- Granulometría
- Peso volumétrico
- Cohesión
- Fricción interna

Los principales tipos de mezclas son:

- Suelo-suelo
- Suelo-cal

- Suelo-cemento

### **Compactación profunda.**

Existen diversos tipos, como:

- Compactación dinámica
- Vibro flotación
- Vibro compactación
- Densificación con explosivos

### **Precarga.**

Consiste en aplicar una carga al subsuelo previamente a la construcción de una estructura o instalación, para provocar la consolidación de aquel, se aplica en suelos compresibles.

Se deben considerar los siguientes factores:

- Deformabilidad y resistencia al corte del suelo
- Tiempo de consolidación
- Tiempo disponible para la obra
- Factores económicos

### **Los métodos de precarga son:**

- Con materiales térreos
- Con agua (en tanques durante la prueba hidrostática)
- Con bombeo, abatiendo el nivel freático (y por tanto la presión de poro en el subsuelo)

Se debe hacer una revisión de estabilidad, el espesor de las capas de materiales térreos que se coloquen como precarga no deben ocasionar falla por resistencia al corte de los suelos subyacentes. Los espesores de las capas iniciales usualmente se limitan a 1-2 metros.

Inyecciones (grouting).

- **Convencionales:**

Las inyecciones convencionales son el conjunto de operaciones consistentes en la introducción de un fluido, a presión, a través de perforaciones, para rellenar huecos y fisuras no accesibles. El fluido posteriormente se solidifica.

Su objetivo es:

Mejorar la resistencia y reducir la deformabilidad de la formación: Inyecciones de “consolidación”.

Disminuir la permeabilidad de la formación: Inyecciones de impermeabilización.

- **Jet grouting:**

Consiste en inyectar un mortero (lechada de cemento o cal), mediante chiflones (chorros de alta presión) especiales, dirigidos lateralmente a las paredes de una perforación mientras esta se realiza. Los chorros excavan y mezclan simultáneamente el suelo con mortero. Para mejorar la acción de corte se añade aire a presión. La lechada se mezcla con los suelos del sitio para formar columnas circulares (pilas) de suelo-mortero (suelo, cemento, o suelo-cal), de dimensiones y propiedades mecánicas específicas. El método común de aplicación consta de dos etapas: perforación y retracción de la herramienta con inyección simultánea.

- **Deep mixing (Mezclado profundo):**

Consiste en mezclar mecánicamente el suelo in situ con un agente cementante en forma de lechada o polvo, dando como resultado columnas solidificadas.

Se usan los siguientes agentes cementantes:

Cal viva o hidratada

Cemento sin o con aditivos (escoria, ceniza).

Escoria granular de horno, mezclada con cal o cemento

Yeso, solo o combinado con cal o cemento.

## **REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE SUELOS FIBRO REFORZADOS.**

El término suelo reforzado describe cualquier masa de suelo a la cual se le mejora su resistencia al corte combinándola con elementos resistentes. Tradicionalmente, los elementos resistentes, o de refuerzo han tomado la forma de barras, tiras de metal, mallas u hojas. Históricamente la técnica se podría considerar milenaria, sin embargo, no es hasta que se patentó en Francia como el sistema de Tierra Reforzada por Vidal (1969), que el suelo reforzado se volvió una técnica usada mundialmente. Este hecho es considerado por muchos como un catalizador que llevó a una rápida expansión del uso, desarrollo e investigación del concepto de suelo reforzado (Pedley, 1990).

### **Tipos de fibras utilizadas en la literatura.**

Dentro de las literaturas existentes de los suelos fibro reforzadas, es fácil distinguir las dos principales ramas en lo que respecta al tipo de fibras utilizadas, una corresponde a las fibras naturales y la otra a las hechas por el hombre o mejor conocidas como fibras sintéticas. Las fibras naturales son aquellas obtenidas de la naturaleza sin la necesidad de llevar a cabo un proceso industrial y, por otra parte, las fibras hechas por el hombre comúnmente provienen de un elaborado proceso industrial o del reciclaje de desechos de productos industriales. (Al-Akhras, Attom, Al-Akhras, & Malkawi, 2008)

De las fibras naturales que han sido utilizadas para el refuerzo del suelo o en el desarrollo de investigación se encuentran las fibras de coco, sisal, palma, yute, lino, paja y bambú.

Fibra de la cáscara del coco

Es la que se utiliza. Normalmente las fibras van de los 50 a los 350 mm de longitud y con un diámetro entre 0.1 y 0.6 mm, están compuestas de lignina, tanino, celulosa, pectina y otras sustancias solubles al agua. Dado su alto contenido en lignina son menos degradables que otras fibras, llegando a ser utilizadas en varios sistemas de taludes reforzados con terminado vegetal. Tienen una gran capacidad para absorber agua y han mostrado ser eficaces para disminuir la tendencia expansiva de los suelos (Hejazi et al., 2012) tiene menor absorción de agua en comparación con la fibra de coco.

Fibras de sisal.

Usada como refuerzo para las hojas de tableros de yeso (como Tablaroca®), con un diámetro que varía de 0.06 a 0.4 mm, mientras el largo varía ya que depende del tamaño de la hoja de donde es obtenida. Al ser adherida al suelo, mejora la ductilidad del composite así como incrementa en menor medida su resistencia a la compresión así como su resistencia al cortante (Ghavami et al., 1999).

Fibras de palma.

Las fibras de palma suelen ser ligeras y resisten al deterioro por lo que son duraderas. Se han reportado mejoras significativas en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante (cohesión y ángulo de fricción), mediante una trabazón entre las fibras de palma y las partículas del suelo.

Fibras de yute.

El yute crece de manera abundante en países como China, India, Bangladesh y Tailandia. El yute es actualmente utilizado para producir geotextiles porosos para aplicaciones en filtración, drenaje y estabilización de suelos. La investigación ha demostrado que al adherir yute al suelo reduce el peso volumétrico seco máximo mientras que aumenta el contenido de humedad óptima (Aggarwal y Sharma, 2010).

Fibras de lino.

El lino es una de las fibras textiles más antiguas conocidas por el hombre, proviene de una flor azul, con longitudes de fibra en promedio de 85 mm. Como fibra ha sido adicionada para mejorar la ductilidad de composites suelo cemento. Como algunas otras fibras, ha sido revestida con sustancias para tratar de mejorar su unión con las partículas de suelo (Segetin, 2007).

Fibras de paja.

La paja es cosechada alrededor de todo el mundo, puede ser usada para construir ladrillos reforzados para mejorar su comportamiento. Es sabido a través de la arqueología que en el antiguo Egipto la paja era utilizada en la fabricación de ladrillos y también se sabe fue utilizado a lo largo de la historia por distintas civilizaciones sin que tuvieron contacto unas con otras necesariamente. Este es un material composite conocido en Latinoamérica y el sur de los Estados Unidos como adobe. En algunas regiones de México, esta técnica de suelo reforzado sigue siendo utilizada en la fabricación de vivienda

de medio rural ya que representa una técnica efectiva, de bajo costo y con materiales que se encuentran en el medio. Aparte de ser de bajo costo, el adobe es considerado un material con ventajas térmicas al crear temperaturas más placenteras dentro de las viviendas.

El adherir paja al suelo, muestra efectos positivos en términos de las propiedades mecánicas del composite, tales como: la reducción de la contracción y del tiempo de curado, así como de mejorar la resistencia a la compresión y al esfuerzo cortante (Bouhicha et al., 2005).

Fibras de bambú.

Es una fibra con altos contenidos de celulosa, tiene una buena resistencia a la tensión, pero un módulo de elasticidad bajo alrededor de los 33-40kN/mm<sup>2</sup>, con una absorción de agua menor a aquella de la fibra de coco. La fibra de bambú ha sido aplicada en el refuerzo del concreto, pero en suelos puede considerarse un campo fértil para la investigación.

La industria de las fibras sintéticas es una industria ya desde hace años consolidada, que desarrolla fibras y aplicaciones para todos los distintos tipos de industria. En lo que respecta al refuerzo de los suelos, las fibras más utilizadas han sido las de polipropileno, poliéster, polietileno, nylon y de vidrio.

Fibras de polipropileno (PP fibers).

Las fibras de polipropileno son ampliamente usadas para el refuerzo del concreto a edades tempranas para evitar el migro agrietamiento causado por el fraguado, también sirven para mejorar su resistencia al fuego. En lo que respecta a los suelos fibro reforzados son también con las que mayor investigación se ha desarrollado. Se ha reportado que mejoran la resistencia a la compresión no confinada y que reducen la contracción volumétrica así como la presión de expansión de las arcillas expansivas (Puppala y Musenda, 2000).

Fibras de poliéster.

Se ha reportado que las inclusiones de fibra de poliéster pueden mejorar en arenas finas su resistencia pico y su resistencia residual, dependiendo en gran medida de la longitud de la fibra, así como de su contenido, teniéndose mejores resultados en tanto que aumenta su longitud y su contenido en porcentaje de peso seco del suelo, siendo una tendencia momentánea ya que hasta cierto punto se comienzan a obtener resultados menos favorables (Tang et al., 2007).

Fibras de polietileno.

La adición de fibras de polietileno al suelo mejora sus capacidades de resistencia mecánica. Dentro de las mejoras se encuentra el aumento de la energía de fractura del suelo. La tenacidad del suelo aumenta resultado de una mayor capacidad de deformación, esta mejora en el comportamiento esfuerzo deformación es ganada ya que las fibras desarrollan tensión (Sobhan y Mashnad, 2002). Otras de las mejoras son el aumento de la resistencia a la compresión no confinada, así como del valor CBR.

Fibras de vidrio.

Las fibras de vidrio mejoran la resistencia pico en arenas limosas, incrementan el esfuerzo desviador y reducen la fragilidad en el composite

teniendo un comportamiento más dúctil. Como se ha visto en las otras fibras, las fibras de vidrio también mejoran la resistencia a la compresión no confinada.

Fibras de nylon.

En lo que respecta a las fibras de nylon, mezclas de las mismas con fibras de yute han mostrado mejoras de hasta el 50% en el valor de CBR comparado con el suelo no reforzado (Gosavi y Patil, 2004).

Interacción del suelo y el refuerzo.

En el concepto tradicional del suelo reforzado (inclusiones planares), los mecanismos de interacción entre el suelo y la inclusión han sido estudiados ampliamente, formando de esta manera una fuerte base teórica que sustenta el éxito y la vasta aplicación del concepto. Sin embargo, los mecanismos de funcionamiento del suelo fibro-reforzado son materia de discusión y estudio, y hasta el momento no se ha llegado a un consenso general. En este capítulo se mencionan algunas hipótesis propuestas por algunos autores acerca del funcionamiento de estos materiales.

### **Mecanismos de interacción suelo-refuerzo tradicional.**

La masa de suelo reforzado es de alguna manera análoga al concreto reforzado ya que las propiedades mecánicas de la masa se mejoran por refuerzos paralelos a la dirección principal de deformación para compensar la falta de resistencia a la tensión del suelo. Las propiedades de resistencia a la tensión mejoradas son el resultado de la interacción entre el suelo y el refuerzo. El material composite tiene las siguientes características (Elías et al.,2001):

La transferencia de esfuerzos entre el suelo y el refuerzo sucede de manera continua a lo largo del refuerzo.

El refuerzo se distribuye a través de toda la masa de suelo con un grado de regularidad y no debe ser solamente local.

Los esfuerzos se transfieren al refuerzo por fricción o por resistencia pasiva dependiendo de la geometría del refuerzo.

La fricción se desarrolla en lugares donde hay desplazamientos relativos de cortante y corresponden al esfuerzo cortante entre el suelo y la superficie del refuerzo. Los elementos de refuerzo donde la fricción es importante deben estar alineados con la dirección relativa de desplazamiento. Ejemplos de ese tipo de refuerzo son las barras de metal, geotextiles y geomallas.

La resistencia pasiva ocurre mediante el desarrollo de esfuerzos en las secciones transversales del refuerzo normales a la dirección del movimiento relativo del refuerzo. La resistencia pasiva es generalmente considerada ser el mecanismo de interacción primario en geomallas rígidas, malla electro soldada, etc. Las crestas transversales en las tiras de metal o en las geomallas triaxiales también proporcionan resistencia pasiva.

La contribución de cada mecanismo de transferencia para un refuerzo en particular dependerá de la rugosidad de la superficie (fricción en la piel), esfuerzo normal efectivo, dimensión de las aberturas de la malla, espesor de

los miembros transversales, y características de elongación del refuerzo. Igualmente, importante para el desarrollo de la interacción son las características del suelo, incluyendo tamaño del grano, distribución del tamaño de grano, forma de la partícula, densidad, contenido de agua, cohesión y rigidez.

La función principal del refuerzo es restringir las deformaciones del suelo. Al hacerlo, los esfuerzos se transfieren del suelo al refuerzo. Estos esfuerzos son soportados por el refuerzo de dos maneras: en tensión o corte y flexión.

La tensión es el modo de acción más común para restringir las deformaciones en el suelo. Todos los elementos de refuerzo longitudinales (elementos de refuerzo alineados en la dirección de la extensión del suelo) son generalmente sometidos a altos esfuerzos de tensión. Los esfuerzos de tensión también se desarrollan en refuerzos flexibles que cruzan planos de corte.

Los elementos de refuerzo transversales que tienen cierta rigidez, pueden soportar esfuerzos cortantes y momentos flexionantes.

### **Mecanismo de interacción suelo-fibra.**

El mecanismo de interacción entre el suelo y la fibra es similar en algunos aspectos al mecanismo de interacción del concepto tradicional de suelo reforzado.

Diambra et al. (2013) estudiaron a fondo el efecto de las fibras en las arenas al realizar ensayos triaxiales de compresión y extensión ante variados esfuerzos confinantes y a distintos contenidos de fibra. Con base en sus resultados mencionan lo que consideran los aspectos más importantes a tener en cuenta en el análisis de los mecanismos de funcionamiento de los suelos fibrorreforzados:

**Contenido de fibra.** Para condiciones de compresión triaxial, el incremento de resistencia movilizada inducida por la adición de fibras es notable y altamente dependiente del contenido de fibras.

**Dependencia del nivel de deformación.** La rigidez inicial del suelo composite no está influenciada por la presencia de fibras, en otras palabras, sobre el dominio de esfuerzos pequeños el comportamiento del composite es solamente gobernado por la matriz de suelo. El comportamiento a compresión de un suelo reforzado diverge del no reforzado conforme la prueba continua, por lo tanto, el mecanismo de interacción arena-fibra es dependiente del nivel de deformación.

**Efecto de unión.** La observación de los especímenes ensayados no muestra visiblemente algún signo de deformación plástica en las fibras, lo que sugiere que, a pesar de que la unión entre las fibras y la arena está totalmente activa, algún deslizamiento relativo parcial puede estar ocurriendo.

**Mecanismo de extracción.** La observación de los especímenes ensayados no muestra signos de rompimiento o de deformación plástica en las fibras. Lo que sugiere que a altas deformaciones, la unión entre las fibras y la arena se puede perder, y la extracción completa de la fibra ocurre.

Orientación de la fibra. En las pruebas triaxiales que realizaron a extensión hubo una mejora despreciable lo que demostró que los planos preferenciales horizontales de las fibras inducidos por la técnica de compactación mediante apisonado pueden ser considerada responsable por esta respuesta con cierto grado de anisotropía.

Efecto volumétrico. En el plano de deformaciones volumétricas, el comportamiento de contracción de los especímenes no reforzados se vuelve más dilatado cuando las fibras son adheridas para ambas condiciones de contracción y extensión. El decremento en relación de vacíos debido a la adición de fibras es típicamente menor a 0.05, y este cambio en la densidad puede explicar solo parcialmente la dilatación incrementada observada en el composite. Asimismo, se puede esperar que la pronunciada contribución a tensión de las fibras proporcione un confinamiento de la matriz mejorado y por lo tanto una mayor respuesta a contracción. Así, un efecto adicional en el mecanismo de interacción arena-fibra debe ser considerado para explicar el incremento en la dilatación.

De la misma manera, Diambra et al. (2012) proponen las siguientes hipótesis para estimar la contribución de las fibras al suelo:

Las fibras están distribuidas homogéneamente a través de la matriz de arena. El estado de esfuerzo, expandimiento y deformación del material composite se derivan de un procedimiento de promedio volumétrico del estado de esfuerzo deformación de ambos constituyentes.

Las fibras se consideran mono-dimensionales, discretas (no continuas), elementos elásticos con solo resistencia a la tensión que se moviliza por las deformaciones por tensión que se desarrollan en el suelo reforzado.

Durante la carga, ocurren desplazamientos relativos parciales entre las fibras y los granos de arena.

Las fibras pueden ser extraídas de la matriz de arena.

La orientación de las fibras debe ser considerada.

La presencia de las fibras afecta la aglomeración de la matriz de arena.

### **Análisis de la interface suelo-fibra.**

La interface entre los materiales de construcción y el suelo juegan un papel importante en muchos sistemas geotécnicos incluyendo las cimentaciones con pilas, los muros de retención y especialmente los sistemas de suelo reforzado. Tang et al. (2010) utilizaron el microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope) a probetas de suelo fibro reforzado, después de la compactación, la fibra es envuelta y trabada por partículas de suelo. Después de que la fibra es sometida a la prueba de extracción, algunas partículas se quedan adheridas a la misma. Esto indica que la estructura de la interface es perturbada e incluso rota durante el proceso de corte. Por lo tanto, cuando ocurre el corte, la fricción en la interface depende en gran manera de la resistencia de las partículas de suelo. Entre más estén

empacadas y trabadas las fibras con el suelo, se tendrá una mayor resistencia en la interface al cortante. (Gray & Al-Refai, 1986)

La resistencia a la rotación de las partículas, así como la penetración de las mismas sobre la fibra pueden incrementar la resistencia a la extracción de las fibras. También se puede mencionar que se puede desarrollar succión mátrica debido a la capilaridad entre el agua, las partículas de suelo y la superficie de la fibra, lo que daría un incremento al esfuerzo efectivo en la interface suelo fibra.

El aumento en el contenido de agua significaría un decremento en la succión mátrica así como podría jugar un papel importante como una capa lubricante en la interface que facilite la rotación de las partículas con la fibra, facilitando la extracción de la misma y por consiguiente, reduciendo la resistencia mecánica del compuesto.

Generalmente, hay dos pruebas mecánicas principales que han sido desarrolladas para evaluar las propiedades de la interface: la prueba de corte directo y la prueba de la extracción (del inglés pull out). Sin embargo, cuando se trata de analizar la estabilidad interna y las interacciones de interface, la prueba de la extracción parece ser la más apropiada (Tang et al., 2010).

De manera análoga, Lopes y Ladeira (1996) indicaron que cualquier incremento en el esfuerzo confinante, el peso específico seco o la tasa de desplazamiento incrementaban la resistencia a la extracción de una geomalla. También influyen la longitud embebida y el esfuerzo vertical efectivo en el comportamiento a la extracción.

Comparada con la Resistencia al corte o a compresión, básicamente la resistencia a tensión del suelo siempre es asumida como cero en la práctica de la ingeniería geotécnica dado su valor bajo. De hecho, es difícil medir precisamente la resistencia a tensión del suelo debido a la falta de técnicas de laboratorio satisfactorias.

Posibles aplicaciones del concepto.

Los suelos cohesivos son aplicados en distintas estructuras térreas, tales como barreras impermeables en los rellenos sanitarios y en corazones impermeables en bordos y presas, de la misma manera, los suelos cohesivos que son excavados para deshecho pueden ser reutilizados como material de relleno en algunas estructuras.

La mayor aplicabilidad del compuesto puede ser en terraplenes, sub rasantes, sub bases y en problemas de estabilidad de taludes. También se propone extrapolar el concepto a la creación de materiales de construcción tradicional tales como los blocks cerámicos para muros.

**POLIETILENO TEREFTALATO (PET)**

El polietileno tereftalato, más conocido por sus siglas en inglés como PET, es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y en textiles. (Gray & Ohashi, 1983)

Químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.

Las propiedades físicas del PET y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas han sido las razones por las que el material ha alcanzado un desarrollo relevante en la producción de fibras textiles y en la producción de una gran diversidad de envases, especialmente botellas, bandejas, charolas y láminas.

Historia

Fue producido por primera vez en 1941 por los científicos británicos Whinfield y Dickson, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras. En esa época su país estaba en guerra y existía una apremiante necesidad de buscar sustitutos para el algodón proveniente de Egipto.

A partir de 1946 se empezó a utilizar industrialmente como fibra y su uso textil ha proseguido hasta el presente. En 1952 se comenzó a emplear en forma de filme para envasar alimentos. Pero la aplicación que le significó su principal mercado fue en envases rígidos, a partir de 1976. Pudo abrirse camino gracias a su particular aptitud para la fabricación de botellas para bebidas poco sensibles al oxígeno como por ejemplo el agua mineral y los refrescos carbonatados. Esto último se menciona porque en este trabajo se busca reducir la gran cantidad de contaminación que se produce con el PET y los envases de plástico son la principal fuente para la fabricación de fibras que se usarán en las probetas de prueba.

Producción mundial de poliéster de fibra cortada: Actualmente China domina la producción de poliéster de fibra cortada a nivel mundial, ya que fabricó el 65 % del total global en 2010. También se muestra la proyección a futuro de cuanto fabricará. (Kumar, Walia, & Mohan, 2006)

### Ventajas

Como algunos de los aspectos positivos que encontramos para el uso de este material, podemos destacar:

Que actúa como barrera para los gases, como el CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y para la humedad.  
Es transparente y cristalino, aunque admite algunos colorantes

Liviano

Impermeable

No tóxico, a cierto grado, ya que todos los plásticos tienen cierto grado de toxicidad, cualidad necesaria para este tipo de productos que están al alcance del público en general

(Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con alimentos)

Inerte (al contenido)

Resistencia a esfuerzos permanentes y al desgaste, ya que presenta alta rigidez y dureza

Alta resistencia química y buenas propiedades térmicas, posee poca deformabilidad al calor

Totalmente reciclable  
Estabilidad a la intemperie  
Alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad que lo hacen muy adecuado para la fabricación de fibras.

Para la fabricación del PET, se han implementado algunas estrategias para minimizar los impactos adversos al ambiente durante la producción, como la utilización del gas natural como fuente de energía, así como el control de emisiones a la atmósfera a través de oxidantes térmicos y el tratamiento de las aguas residuales. (Maher & Gray, 1990)

Usos y aplicaciones

Las fibras de PET son 50% cristalinas y el ángulo de sus moléculas puede variar. Sus propiedades son muy sensibles a los procesos termodinámicos. Básicamente el poliéster, a través de modificaciones químicas y físicas, puede ser adaptado hacia el uso final que se le va a dar, como puede ser fibra de ropa, textiles, para el hogar o simplemente filamentos o hilos. (Ghavami, Romildo, Toledo, & Normando, 1999)

Estos son algunos ejemplos de lo que se puede fabricar con PET:

Fabricación de envases para bebidas

Fabricación de vasijas de ingeniería, medicina, agricultura, etc.

Fijación ósea o sustituciones de fragmentos óseos (biomedicina).

Fabricación de juguetes, agentes adhesivos, colorantes y pinturas.

Fabricación de componentes eléctricos y electrónicos.

Fabricación de cintas adhesivas, hilos de refuerzo para neumáticos.

Fabricación de carcasas, interruptores y capacitadores.

Fabricación de pinzas para la industria textil

(Según su mezcla empleada para la fabricación de tejidos para camisería, para pantalones, faldas, hilos trajes completos, ropa de cama y mesa, género de punto, etc.)

Artículos que no cambien mucho de forma como ropa interior o para ropa exterior ya que tiene que mostrar alta estabilidad y forma consistente.

### **Impacto ambiental del PET**

En la actualidad es difícil prescindir de los plásticos PET, no sólo por su utilidad sino también por la importancia económica que tienen. Esto se refleja en los índices de crecimiento de esta industria que, desde principios del siglo pasado, supera a casi todas las actividades industriales.

Los plásticos PET se utilizan para embalajes, para envasar, conservar y distribuir alimentos, medicamentos, bebidas, agua, artículos de limpieza, de tocador, cosmetología y un gran número de otros productos que pueden llegar a la población en forma segura, higiénica y práctica.

Su uso cada vez más creciente se debe a las características de los plásticos PET. Debido a que son livianos, resultan de fácil manipulación y optimización de costos. Los envases plásticos son capaces de adoptar

diferentes formas como bolsas, botellas, frascos, películas finas y tuberías, entre otros. Son aislantes térmicos y eléctricos, resisten a la corrosión y otros factores químicos y son fáciles de manejar. Los plásticos tienen afinidad entre sí y con otros materiales, admitiendo diversas combinaciones (por ejemplo, los envases multicapa).

En función de las propiedades de los plásticos PET, la estructura del mercado ha crecido considerablemente. La producción global de plásticos se ha disparado en los últimos 50 años, y en especial en las últimas décadas. Entre 2002-2013 aumentó un 50%: de 204 millones de toneladas en 2002, a 299 millones de toneladas en 2013. Se estima que en 2020 se superarán los 500 millones de toneladas anuales, lo que supondría un 900% más que los niveles de 1980.

A pesar de su indiscutible utilidad en la vida cotidiana, una vez que los plásticos se han utilizado se convierten en residuos que forman parte de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados en grandes cantidades. Los RSU originan problemas de contaminación del agua, aire y suelo, que impactan directamente al ambiente y a la salud.

A nivel mundial, se calcula que 25 millones de toneladas de plásticos se acumulan en el ambiente cada año y pueden permanecer inalterables por un periodo de entre 100 y 500 años. Esto se debe a que su degradación es muy lenta y consiste principalmente en su fragmentación en partículas más pequeñas, mismas que se distribuyen en los mares (en estos se han encontrado entre 3 a 30 kg/km<sup>2</sup>), ríos, sedimentos y suelos, entre otros. Es común observar paisajes en caminos, áreas naturales protegidas, carreteras, lagos, entre otros, con plásticos tirados como parte de lo mismo.

Debido a la necesidad de seguir utilizando plásticos, pero por otro lado se producen impactos al ambiente, el reciclaje es una alternativa para contribuir con la solución de este problema. El reciclaje se define como la transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos.

Por ejemplo, Japón registró una tasa de reciclaje de botellas de PET (volumen total de recolección/volumen de botellas vendidas) de 77,9 % en 2009, según datos del Consejo de Reciclaje de Botellas de PET de ese país. Por su parte, Europa tiene cifras consolidadas de 48,3%, de acuerdo con la Asociación Europea de Reciclaje de Contenedores de PET (Petcore), y Estados Unidos de 28%, según la Asociación de Resinas de PET (Petra). Brasil es el líder con una tasa de 55,6%, seguido por Argentina con 34%, según reportes de la Asociación Brasileña de la Industria del PET (Abipet).

Pero la gran sorpresa la representa México ya que desde hace siete años se ha convertido en el país que más PET recicla en el mundo. De hecho, se estima que su posición está por encima incluso de países más desarrollados de la Unión Europea, Estados Unidos y Japón debido a que cuenta con la planta de reciclaje más grande del planeta, y un alto porcentaje lo dedica a fabricar nuevos envases, la solución más sostenible para este tipo de residuos.

En el Perú, se producen unas 3 500 millones de botellas de plástico cada año, de las cuales, menos del 50 % son recicladas, explica Albina Ruiz, de la ONG Ciudad Saludable. Que el porcentaje de reciclaje sea tan pequeño es un grave problema porque la contaminación causada por el uso de materiales descartables que no pueden ser reutilizados es una de las mayores fuentes de gases de efecto invernadero. En el Perú existen más de 100 mil recicladores pero su actividad está limitada por no haber un mercado de reúso de PET, esto debido a políticas restrictivas e informalidad. (Ghavami, Romildo, Toledo, & Normando, 1999)

El tema del acopio es crítico para la industria de reciclaje en América Latina, donde no hay una cultura de separación en la fuente. Aun así, las cifras de recuperación muestran un gran potencial.

## CONCEPTOS

### Contenido de humedad

El contenido de humedad de un suelo, se asume como la cantidad de agua dentro de los espacios/poros entre los granos del suelo, el cual se quita por secado en horno a 105-110°C. Cuando el suelo se calienta por un periodo de 12-24 horas y se denomina al suelo como seco.

En suelos granulares no cohesivos este procedimiento remueve toda el agua presente. En la siguiente ilustración se muestra de forma simple las zonas que el agua rodea de la partícula de arcilla y se determinan por la consideración de las cinco categorías del agua, explicadas a continuación e indicadas en la figura:



Figura 1 Agua en una partícula arcillosa.

Agua absorbida, retenida en la superficie de la partícula por grandes fuerzas de atracción eléctricas y virtualmente en un estado sólido. Esta capa es de un espesor muy pequeño, del orden de 0.005µm. Esta agua no se puede remover por secado en horno a 110°C, por lo que se considera parte del grano del suelo sólido.

Agua que no está fuertemente retenida y puede ser removida por secado en horno, pero no por secado al aire (humedad higroscópica)

Agua capilar, retenida por tensión superficial, generalmente removible por secado al aire.

Agua gravitacional, la cual se puede mover entre los espacios vacíos de los granos del suelo, se remueve por drenaje.

Agua combinada químicamente. Crea hidratación dentro de la estructura cristalina, exceptuando el yeso y otras arcillas tropicales. Esta agua generalmente no se remueve por secado en horno.

Para los ensayos en el suelo se considera el contenido de humedad que se remueve a 105-110°C. El agua mencionada en la categoría 1 no se toma en cuenta en la determinación de contenido de humedad. El contenido de humedad se expresa usualmente como porcentaje, pero siempre en base a la masa del suelo secado a horno. Si la masa de agua removida por secado en horno se denota por  $m_W$  y la masa del suelo seco por  $m_D$ , el contenido de agua  $w$  se obtiene por la siguiente ecuación:

$$w(\%) = \frac{m_W}{m_D} (100)$$

#### Ecuación 1 Contenido de Humedad Límites de Atterberg

También conocidos como límites de consistencia, es una medida básica de la naturaleza de un suelo granular fino. El científico sueco Albert Mauritz Atterberg fue quien definió estas medidas, las cuales fueron mejoradas posteriormente por Arthur Casagrande.

Estos límites se basan en el concepto de que en un suelo solo pueden existir cuatro estados de consistencia dependiendo del contenido de agua o contenido de humedad que este tenga: sólido, semisólido, plástico y líquido. La consistencia y comportamiento del suelo en cada estado es diferente, por lo que sus propiedades mecánicas también.

Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado a otro son los denominados límites de Atterberg. Estos se utilizan para distinguir los diferentes tipos de suelo.

Estos límites se usan para caracterizar suelos arcillosos o limosos, ya que en éstos existe la contracción y la expansión del suelo dependiendo su contenido de humedad, provocando variaciones en su resistencia al corte.

El cambio de una fase a otra no se puede observar en límites precisos, pero toman lugar como una transición gradual. Sin embargo, tres límites específicos se han establecido empíricamente y son universalmente reconocidos.

Límite líquido LL (WL).

Límite plástico PL (WP).

Límite de contracción SL (WS)

#### Teoría de Mohr – Coulomb

La relación entre la resistencia máxima al corte y el esfuerzo normal de un suelo es representada por la siguiente ecuación:

$$\tau = c_u + \sigma \tan \varphi$$

#### Ecuación 2 Resistencia al corte

Esta ecuación lineal indica la relación entre el esfuerzo cortante y el esfuerzo normal que existe en un suelo, la cual fue inicialmente desarrollada por Charles- Augustin de Coulomb en el año 1773.

Pero a finales del siglo XIX Christian Otto Mohr desarrolló una forma generalizada de la teoría anterior en donde por medio de una circunferencia presentada en una gráfica bidimensional indica los esfuerzos máximos que presenta un material para condiciones específicas. Dicha forma generalizada afectó la interpretación del criterio, pero no la esencia de la teoría de Coulomb. Para la mayoría de los propósitos prácticos en suelos, esta relación lineal mantiene y representa el criterio de falla más aceptado. La curva graficada de dicha ecuación es conocida como la “envolvente de falla”

De los círculos de Mohr se tiene que:

$$\sigma = \sigma_m - \tau_m (\operatorname{sen} \varphi)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$\tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

#### Ecuación 3 Envolvente de falla

Siendo:

$\sigma_1$ : el esfuerzo principal mayor y  $\sigma_3$  el esfuerzo principal menor.

$\tau_m$ : Esfuerzo tangencial

$\Phi$ : Angulo de

$\sigma_m$ : Esfuerzo

Para el criterio de Mohr – Coulomb (FIGURA 2) se puede observar en términos simples que la resistencia al corte de los suelos se realiza generalmente por dos componentes:

Fricción ( $\tan\phi$ ): es debida al entrelace de las partículas y la fricción entre ellas cuando son sometidas a un esfuerzo normal.

Cohesión ( $c_u$ ): es debida a fuerzas internas que mantienen las partículas del suelo juntas en una masa sólida.

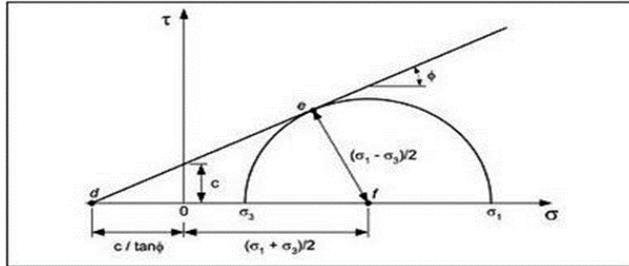


Figura 2 Círculo de Mohr-Coulomb.

Sin embargo, la ecuación anterior no condujo siempre a diseños satisfactorios para estructuras de suelo hasta que Karl von Terzaghi se percató de que el agua no puede soportar esfuerzos cortantes substanciales, por lo que la resistencia al corte de un suelo debe ser el resultado únicamente de la resistencia a la fricción que se produce en los puntos de contacto entre partículas; la magnitud de ésta depende solo de la magnitud de los esfuerzos efectivos que soporta el esqueleto de suelo. Por lo que la ecuación de Coulomb que se muestra anteriormente es aplicable únicamente para esfuerzos totales.

Siendo así que Terzaghi publicó el principio de esfuerzos efectivos, donde

$$\sigma = \sigma' + u$$

dice que el esfuerzo total ejercido en un suelo es la adición del esfuerzo que soporta el esqueleto del suelo (esfuerzo efectivo) con la presión que ejercen los poros del mismo suelo:

Ecuación 4 Esfuerzo efectivo

Donde:

- $\sigma$  : esfuerzo total
- $\sigma'$  : esfuerzo efectivo
- $u$  : presión de poros

Cuando se consideran esfuerzos efectivos, esta ecuación tiene que ser modificada para tomar en cuenta las presiones de poro. Dicha ecuación es:

$$\tau = c_u' + \sigma' \tan\phi'$$

Ecuación 5 Esfuerzo efectivo

En la cual los parámetros  $c_u'$  y  $\phi'$  son propiedad del esqueleto de suelo, denominados cohesión efectiva y ángulo de fricción efectiva, respectivamente.

El componente friccionante aumenta conforme aumenta el esfuerzo normal, pero la componente de cohesión permanece constante. Si no hay esfuerzo normal la fricción desaparece.

Los suelos pueden clasificarse en tres categorías relacionadas con sus propiedades de resistencia:

Suelos friccionantes o no cohesivos: suelos granulares. Estos suelos no poseen cohesión ( $c_u=0$ ), pero deriva su resistencia al corte gracias a la fricción intergranular. Su envolvente de falla pasa por el origen.

Suelos cohesivos: como las arcillas saturadas, las cuales presentan cohesión, pero si no ocurre un cambio de contenido de agua durante un ensaye la envolvente de falla será virtualmente horizontal ( $\phi=0$ ).

Suelos cohesivos-friccionantes: los cuales poseen cohesión tanto como fricción.

### **Relación esfuerzo deformación**

Cuando un suelo es sujeto a esfuerzos, se generan deformaciones. Para determinar la relación esfuerzo – deformación comúnmente se traza la curva esfuerzo – deformación.

El grado de deformación producido por un esfuerzo dependerá de la composición, relación de vacíos, esfuerzo aplicado, módulo de elasticidad, etc.

Una simplificación común es la de asumir que el suelo es un material isotrópico y elástico para facilitar el análisis de su comportamiento cuando es sometido a cargas externas. Esto es válido para ciertas condiciones de análisis dependiendo.

### **Ensayo de compactación Proctor**

El ensayo de compactación Proctor, desarrollado por el ingeniero Ralph R. Proctor, es uno de los procedimientos más usados para el control de la compactación de suelos. Éste consiste en un proceso repetitivo, cuyo objetivo es alcanzar una densidad específica con cierto contenido de agua, con el fin de garantizar y obtener la densidad máxima o requerida del suelo.

Es sabido que al aumentar la humedad de un suelo su densidad se incrementa hasta alcanzar un punto máximo denominado humedad óptima. Al llegar a ese punto, cualquier aumento de humedad no contribuirá a una mayor densificación del suelo, por el contrario, existirá una reducción en esta.

Los ensayos más comunes son el Proctor estándar (ASTM D-698) y modificado (ASTM D1557). En ambos ensayos se usa el suelo mezclado con diferentes cantidades de agua, colocándolas en un molde con medidas específicas y compactándolas con un pisón, registrando las humedades y densidades secas correspondientes. Estos valores se colocan en un gráfico cartesiano donde la abscisa corresponde a la humedad (%) y la ordenada a la densidad seca, pudiendo con éstos trazar una curva en la que se define el punto máximo de densidad seca y con él la humedad óptima para dicho suelo.

La diferencia entre la prueba Proctor estándar y la modificada es la energía de compactación utilizada. En la estándar se deja caer un peso de 2.49 kg de una altura de 30.5cm compactando el suelo en tres capas con 25 golpes; y en el modificado se utiliza un peso de 4.54 kg a una altura de 45.7 cm compactando el suelo en 5 capas con 50 golpes a cada una. Esta diferencia se debe a la evolución de los equipos de compactación con mayor peso, lo que permite densidades más altas en el campo. En resumen, la calidad de compactación depende del contenido de humedad, método de compactación y energía de compactación.

El Ensayo CBR (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo y para poder evaluar la calidad del terreno para subrasante, sub base y base de pavimentos.

### **Pruebas de compresión rápidas**

Las pruebas que se describirán son rápidas y simples, donde no se permite el cambio en contenido de humedad del espécimen cilíndrico durante el ensayo de compresión axial.

Estas pruebas se dividen en dos categorías:

- Pruebas de compresión uniaxial o no confinadas.
- Pruebas de compresión triaxial.

La primera prueba es un caso especial de la compresión triaxial donde el esfuerzo de confinamiento es nulo, en el cual no se requiere de un aparato que aplique confinamiento.

Para que una prueba de compresión esté dentro de la clasificación “rápida”, debe de cumplir con los siguientes requisitos:

A un espécimen cilíndrico de suelo se le aplica un incremento de carga axial hasta que sucede la falla. En la prueba no confinada, la carga axial es la única fuerza o esfuerzo aplicado al espécimen. En una prueba triaxial se aplica al espécimen una presión de confinamiento inicial, la cual se mantiene constante mientras se incrementa la carga axial.

No se permite el drenaje del espécimen durante la aplicación de la presión de confinamiento ni durante la carga axial. Es por ello que estas pruebas se denominan como pruebas “no drenadas”, por lo que no existe cambio en el contenido de humedad ni el volumen de la probeta.

La proporción altura: Para las normas ASTM es permisible la proporción 3:1. Si la proporción es menor que 2:1, los resultados pueden ser influenciados por las condiciones de la frontera. Si la proporción es mayor que 3:1 puede ocurrir que el espécimen falle por deformación excesiva.

Existe un control de la deformación por medio de la aplicación de una velocidad constante de compresión, usualmente es del 2% de deformación de la altura del espécimen por minuto. Rangos del 0.3%-10% deformación/min de deformación dan pequeñas diferencias en los resultados, pero el 2% deformación/min es una velocidad aceptada como estándar.

La falla normalmente implica la condición donde el espécimen no soporta más incremento en el esfuerzo o la deformación alcanza cierto porcentaje.

Tipos de fallas:

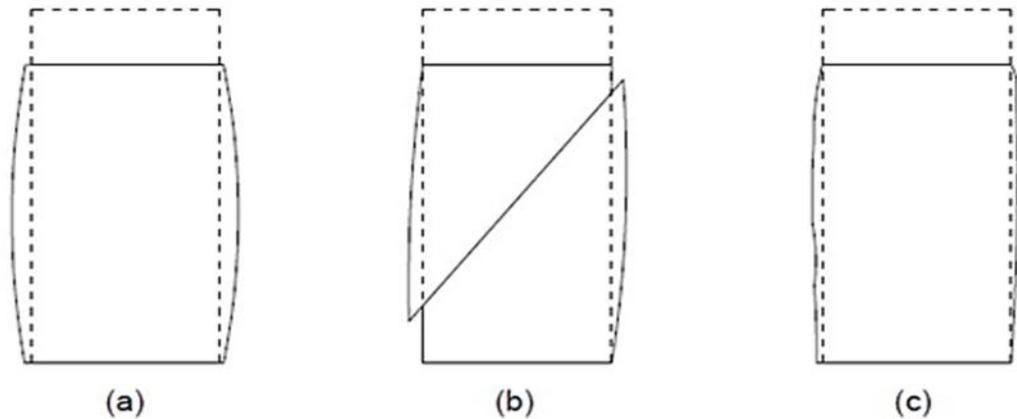


Figura 3 Tipos de falla: a) Falla plástica, b) Falla frágil y c) Falla intermedia  
Falla plástica, en la cual el espécimen experimenta una deformación lateral (en forma de barril) sin la generación de fisuras.

Falla frágil, donde el espécimen experimenta una fisura diagonal, debido a los esfuerzos cortantes sobre una o más superficies bien definidas.

Falla intermedia o compuesta donde también el espécimen experimenta fisuras.

### Resistencia al corte de suelos cohesivos

Lo ideal es determinar parámetros del suelo por medio de pruebas triaxiales con especímenes inalterados. La resistencia al corte de los suelos cohesivos depende de diferentes factores, tales como su composición mineralógica, tamaño de las partículas, forma, textura, estructura de los granos y su contenido de humedad.

### MEZCLADO DE INCLUSIÓN – SUELO

El refuerzo de un suelo por medio de fibras discretas parte de la teoría de que éstas se encuentran distribuidas aleatoriamente en el espécimen para que no se presenten planos de debilidad y así poder absorber la energía aplicada al suelo bajo cualquier condición de carga incrementando la estabilidad en el espécimen.

Para lograr lo anterior, la estabilidad de un suelo reforzado por fibras aleatoriamente distribuidas está en función del adecuado proceso de mezclado. Para cada tipo de suelo, dependiendo de sus propiedades físicas y cantidad de suelo que se requiera mezclar, el procedimiento podrá ser diferente y no se cuenta con un protocolo estandarizado a seguir.

Diferentes autores relacionados han propuesto diversos métodos para el mezclado de suelos cohesivos con inclusión de fibras:

Andersland O.B. et al. (1979) Secaron las fibras de pulpa y las mezclaron con caolinita igualmente seca en concentraciones previamente determinadas. Agregaron agua en cantidad necesaria hasta formar una suspensión acuosa. Esta suspensión se consolidó hasta que la masa formara un cilindro blando, de la cual pequeñas muestras podían ser cortadas en tamaños deseados para realizar las pruebas. Una cortadora rotativa de alta velocidad minimizó los problemas con los cortes realizados a la mezcla de suelo-fibra.

M. Mirzababaei et al. Con el fin de preparar una mezcla uniforme de la arcilla con la fibra, se llevaron a cabo varias pruebas. Para la realización de los ensayos triaxiales adoptaron la siguiente metodología para obtener una mezcla suelo-fibra uniforme. Primero, la cantidad de fibra requerida, basada en el peso seco del suelo, es pesada y mezclada con agua hasta que todas las fibras estén húmedas. Para crear la muestra se esparce sobre las fibras mojadas un 20% del suelo requerido y se mezclan uniformemente hasta que las fibras sean cubiertas por una fina capa de suelo. La mezcla preparada se coloca en horno a una temperatura de 105°C. Cuando la mezcla esté completamente seca, se tritura el suelo hasta que tenga forma de polvo y las fibras se dejan intactas. Se le agrega la cantidad requerida de agua para satisfacer que tenga la humedad predeterminada y al final se mezcla con el suelo restante.

Pradhan P.K. et al. Realizaron procedimientos de mezclado para sus pruebas triaxiales, donde las fibras fueron cortadas en longitudes promedio de 15, 20 y 25 mm, las cuales se consideraron para tres diferentes porcentajes en la investigación. El suelo seco se hizo pasar por un tamiz de 2 mm. Las fibras se agregaron a dicho suelo, variando sus porcentajes entre 0 - 1% del peso del suelo.

### **Mezclado en laboratorio**

El mezclado del suelo con fibras de PET realizado en laboratorio presenta limitaciones para contenidos de fibra superiores al 1.5%, debido a que se forman grumos. Por esta razón, se decidió no sobrepasar  $q=1.5\%$  del contenido de fibra.

El mezclado de suelo-fibra-agua fue hecho sobre una bandeja metálica no porosa para evitar la pérdida de agua. La mezcla se realizó manualmente hasta alcanzar la homogeneidad.

Es importante mencionar, que éste procedimiento es una alternativa al descrito por otros autores. Se experimentó con tres diferentes tipos de mezclado:

1) Capa de suelo seco + Capa de agua + Capa de PET.

Los 3 elementos separados en capas en el orden mencionado. Al mezclar de esta forma no es muy buena la homogenización de los materiales, ya que cuesta más trabajo mezclar el agua con el suelo para que obtenga la humedad óptima y las fibras de PET no son capaces de mezclarse totalmente con el suelo.

2) Capas proporcionales.

En esta prueba se separó en 6 capas la cantidad completa necesaria para formar 1 probeta, siendo la distribución de esta forma:

120 gramos de suelo / 6 capas = 20 grs de suelo por capa

49.20 gramos de agua/ 6 capas= 8.2grs de agua por capa

12 grs de PET/ 6 capas= 2 grs de PET por capa

Esta técnica tiene el mismo resultado que la primera técnica propuesta y el agua se evapora de forma más rápida.

3) Mezcla de agua con suelo y posteriormente adiciones de las fibras de PET.

Esta técnica tiene mejores resultados que los dos mencionados anteriormente, la mezcla de suelo y agua se puede hacer de forma muy fácil, alcanzando rápidamente el porcentaje de humedad óptimo. Una vez mezclado el suelo con el agua se agregan las fibras de PET disgregadas y se vuelve a mezclar, esta vez se puede observar que el PET tiene mejor adherencia con el suelo ya mezclado.

La técnica 3 fue la que se usó para elaborar todas las probetas de esta investigación.

### **Mezclado en campo**

En esta investigación final se describirá un procedimiento constructivo usando fibras de P.E.T. con suelo.

Fernández Loaiza Carlos (1992) describe un método adicional en su libro “Mejoramiento y estabilización de suelos”, el cual se presenta a continuación:

1) Disgregación:

Para disgregar las arcillas se pueden emplear arados de discos o de rastras.

2) Mezclado:

De acuerdo al peso seco del suelo, se le agrega la proporción de la inclusión previamente determinada. El mezclado se realiza en parte durante el proceso de disgregación, aplicando una tercera parte del refuerzo al suelo, para posteriormente mezclar parcialmente con una Motoconformadora, repitiendo lo anterior dos veces sucesivas, empleando en cada vez un tercio del refuerzo total, buscando la homogeneidad.

Si el suelo cohesivo está saturado, la mezcla de éste con la inclusión podrá dificultarse, por lo que se recomienda utilizar revolventoras que funcionen como hornos para secar el suelo arcilloso y obtener una mezcla homogénea. No se deberá realizar la mezcla en situación de viento excesivo para evitar pérdidas del material de refuerzo y contaminación de la zona.

3) Adición de agua de compactación:

Esta es una operación que deberá controlarse de forma continua, ya que durante el tiempo caluroso puede evaporarse el agua de compactación rápidamente, por lo cual es conveniente que las etapas de construcción posteriores a la adición del agua se lleven a cabo lo más rápidamente posible, e inclusive se puede llegar a requerir que dichas etapas se realicen durante la noche. Es necesario cuidar la cantidad de agua que se usará para lograr la humedad óptima, ya que se obtendrán resultados deficientes al compactar. Se debe humedecer y escarificar a las superficies expuestas del suelo antes de colocar una capa para lograr una mejor adhesión y compactar.

4) Suelo de apoyo de la capa estabilizada:

El suelo sobre el cual se va a colocar la capa estabilizada deberá estar previamente nivelado y compactado. Cuando se juzgue necesario, deberá colocarse una capa de material granular que sirva para cortar la ascensión capilar.

5) Mezclado extendido del material:

El mezclado del suelo con el agua puede efectuarse con Motoconformadora, repitiendo las operaciones todas las veces que se juzgue necesario hasta obtener un material uniforme y homogéneo. Así mismo, la Motoconformadora sirve para el extendido del material, debiéndose comprobar en diferentes puntos, la uniformidad en los espesores tendidos.

6) Compactación:

La operación de compactación puede llevarse a cabo en cualquier forma convencional existente. El rodillo pata de cabra resulta adecuado en el caso de suelos finos y generalmente se ha recomendado lastrarlos para lograr mayor eficiencia. Se recomienda su empleo en la compactación inicial utilizando presiones de contacto de 5 a 9 kg/cm<sup>2</sup> para suelos limosos o finos sin cohesión, de 7 a 14 kg/cm<sup>2</sup> para suelos con arcilla de plasticidad alta. Se recomienda asimismo no compactar por capas con espesores superiores a los 15 cm.

Para tener una mezcla en campo lo más uniforme posible, se recomienda seguir los siguientes procesos: Alcanzar, salvo criterios específicos de la obra, densidades del orden del 95% del Proctor estándar.

A la fecha se han aplicado con éxito y eficiencia algunas máquinas que en forma automática recogen el material acamellonado que generalmente en una sola pasada pulverizan, mezclan en seco con otro material, humedecen, vuelven a mezclar en húmedo y finalmente distribuyen el compuesto. Estas máquinas, en general, son móviles y realizan su trabajo in situ, aunque también existen instalaciones fijas que fabrican la mezcla de un punto del cual se recoge en camiones que la trasladan al lugar para su colocación.

### III. CONCLUSION

Se logró recopilar la información para para analizar la inclusión de fibras PET en el reforzamiento de suelos cohesivos para terraplenes de obras viales, La Libertad mediante la investigación en artículos científicos.

- Se logró recopilar la información necesaria sobre suelos cohesivos indicando que este suelo no tiene las suficientes propiedades mecánicas para obras viales.
- Se identificó nuevas teorías en el mejoramiento de suelos, logrando nuevas aplicaciones sobre suelos cohesivos.
- Se evaluó métodos para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos y que estos sean capaces de soportar cargas viales.

- Se revisó información sobre suelos fibro reforzados evaluando sus propiedades mecánicas y físicas.
- Se investigó sobre el Polietileno Tereftalato (PET) conociendo sus propiedades y el aporte en el mejoramiento de suelos.

#### IV. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

Al-Akhras, M., Attom, M., Al-Akhras, K., & Malkawi, A. (2008). Influence of Fibers o Swelling Properties of Clayey Soil. *Geosynthetics International Journal*(4), pp. 304-309.

Almanza Álvarez, I. (2015). Estudio del Uso de Polietileno Tereftalato como Material de Refuerzo de Estructuras Téreas Conformadas por Suelos Cohesivos.

Al-Refeai, T. (1991). Behavior of Granular Soils Reinforced with Discrete Randomly Oriented Inclusions. *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, X, pp. 319-335.

Andersland, O., & Khattak, A. (1979). Shear Strength of Kaolinite/Fiber Soil Mixtures, *Proceedings. International Conference on Soil Reinforcement*, I, pp. 11-16.

Arriaga Vásquez, D. (2006). Aspectos Cosntructivos en la Técnica de Compactación Dinámica para Mejoramiento Masivo de Suelos.

Consoli, N., & Prietto, D. (1998). Influence of Fiber and Cement Addition in Sandy Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, CXXIV, pp. 1211-1214.

Consoli, N., Casagrande, M., & P.D.M. Thome, A. (2003). Plate Load Test on Fober-Reinforced Soil. *Journal of geotechnical and Geoenviromental Engineering*, ASCE, CXXIX, pp. 951-955.

Ghavami, K., Romildo, D., Toledo, F., & Normando, P. (1999). Behaviour of Composite Soil Reinforced with Natural Fibres. *Cement and Concrete Composites*, XXI, pp. 39-48.

---

Ghiassian, H., Poorebrahim, G., & Gray, D. (2004). Soil Reinforcement with Recycled Carpet Wastes. *Waste Management Research*(22), pp. 108-114.

Gray, D., & Al-Refai, T. (1986). Behavior of Fabric versus Fiber-Reinforced Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, CXII(8), pp. 804-820.

Gray, D., & Ohashi, H. (1983). Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, CIX(3), pp. 335-353.

Juárez Badillo, E. (2007). *Mecánica de Suelos*. Limusa.

Kumar, A., Walia, B., & Mohan, J. (2006). Compressive Strength of Fiber Reinforced Highly Compressible Clay. *Journal of Construction and Buildings Materials*, XX, pp. 1063-1068.

López Ortiz, J. (2006). *Suelos Arcillosos Reforzados con Materiales de Plástico Reciclado (PET)*.

Maher, M., & Gray, D. (1990). Static Response of Sand Reinforced with Randomly Distributed Fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, CXVI(11).

Ranjan, G., Vasan, R., & Charan, H. (1996). Probabilistic Analysis of Randomly Distributed Fiber Reinforced Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, CXXII, pp. 419-426.

Rosales Hurtado, D. (2014). *Mejoramiento de Suelos Expansivos mediante la Inclusión de Fibras*.

Sherwell Betancourt, G. (2014). *Estudio del Uso de Polietileno Tereftalato como Material de Refuerzo de Estructuras Téreas Conformadas por Suelo Fino*.

Villalaz, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones* (Quinta ed.). Limusa.

Wang, Y. (199). Utilization of Recycled Carpet Wasnd Soil. *Journal of Polymer-Plastic Technology Engineering*, III(3), pp. 533-546.

V. ANEXOS

ANEXO N° 1

Items	TEMA	AUTOR	FUENTE
		▪	▪
		▪	▪
		▪	▪
		▪	
		▪	
		▪	
		▪	▪
		▪	▪

ANEXO N° 2

MATRIZ DE DATOS

Items	TEMA	AUTOR	FUENTE
1	Influencia de las fibras en las propiedades de hinchamiento del suelo arcilloso	<ul style="list-style-type: none"> <li>Al-Akhras, M., Attom, M., Al-Akhras, K., &amp; Malkawi, A.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><a href="https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.../gein.2008.15.4.304">https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.../gein.2008.15.4.304</a></li> </ul>
2	Estudio del uso de polietileno tereftalato	<ul style="list-style-type: none"> <li>Almanza Álvarez, I.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><a href="http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/.../browse?...ESTUDIO...USO...POLIETILENO+TER...">www.ptolomeo.unam.mx:8080/.../browse?...ESTUDIO...USO...POLIETILENO+TER...</a></li> </ul>
3		<ul style="list-style-type: none"> <li>Al-Refeai, T.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><a href="https://www.researchgate.net/.../312306567_Effect_of_Geotex_tile...">https://www.researchgate.net/.../312306567 Effect of Geotex tile ...</a></li> </ul>



	Efecto del refuerzo de geotextil sobre la resistencia al corte del suelo arenoso		
4	Propiedades mecánicas del compuesto de caolín / suelo de fibra	▪ Andersland, O., & Khattak, A.	▪ <a href="https://www.researchgate.net/.../248878615_Mechanical_Properti...">https://www.researchgate.net/.../248878615_Mechanical_Properti...</a>
5	Aspectos Constructivos en la Técnica de Compactación Dinámica para Mejoramiento Masivo de Suelos	▪ Arriaga Vásquez, D.	• <a href="http://132.248.9.195/pd2006/0607811/0607811.pdf">http://132.248.9.195/pd2006/0607811/0607811.pdf</a>
6	Influencia de la adición de fibra y cemento en el comportamiento del suelo arenoso	▪ Consoli, N., & Prietto, D.	▪ <a href="https://scholar.google.com.br/citations?user=8xefkuwAAA&amp;hl=en">https://scholar.google.com.br/citations?user=8xefkuwAAA&amp;hl=en</a>
7	Comportamiento de suelo compuesto reforzado con fibras naturales	▪ Ghavami, K., Romildo, D., Toledo, F., & Normando, P.	▪ <a href="http://www.academia.edu/.../Behaviour_of_composite_soil_reinforced">www.academia.edu /.../ Behaviour_of_composite_soil_reinforced</a>



8	Mecánica de Suelos y Cimentaciones	▪ Villalaz, C.	Villalaz, C. (2004). Mecánica de Suelos y Cimentaciones (Quinta ed.). Limusa.
---	------------------------------------	----------------	---