



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

**ESTUDIO DEL USO DE POLIETILENO TEREFALATO COMO MATERIAL DE
REFUERZO DE ESTRUCTURAS TÉRREAS CONFORMADAS POR SUELOS
COHESIVOS.**

MODALIDAD DE GRADUACIÓN: TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ISAÍ ALMANZA ÁLVAREZ

TUTOR PRINCIPAL

**DR. EDUARDO BOTERO JARAMILLO,
FACULTAD DE INGENIERIA**

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Ing. Mendoza Sánchez Ernesto René

Secretario: Dr. Meza Puesto Jesús Hugo

Vocal: Dr. Botero Jaramillo Eduardo

1^{er.} Suplente: M. en I. Narcia Morales Carlos

2^{d o.} Suplente: M.I. Candelas Ramírez Luis

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:
Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria, México D.F.

TUTOR DE TESIS:

NOMBRE

EDUARDO BOTERO JARAMILLO

FIRMA

Agradecimientos.

A Dios.

Por darme la oportunidad de estudiar esta maestría y poder concluirla.

A mis padres

Isaí Almanza y Angélica M. Álvarez, quienes me apoyaron en todo momento y por sus ánimos para poder concluir este ciclo en mi vida.

A mis hermanas

Ammi y Angélica, por estar siempre a mi lado y su motivación para terminar la maestría.

A la U.N.A.M.

Por permitirme ser su alumno y todos los servicios ofrecidos durante mi estancia.

Al Instituto de Ingeniería.

Por haberme prestado el equipo y recursos necesarios para poder terminar esta tesis.

A CONACYT.

Por haberme apoyado económicamente durante el programa de maestría.

Al Dr. Eduardo Botero

Por aceptarme como su tutelado, por todas sus asesorías y su disposición para ayudarme a concluir esta tesis.

Al Ing. Ricardo B. Cervantes.

Quien fue parte de mi formación profesional y su amistad.

A mis amigos.

Alejandra Brambila, Daniela Alfaro, Mauricio Bernal, Jemina Neria y Jorge Ocampo. Por los ánimos que me dieron para poder terminar la tesis así como su asistencia técnica para poder concluir la misma.

RESUMEN

En esta tesis se estudia el uso y el mejoramiento de un suelo limoso de alta plasticidad mediante la adición de fibras de Polietileno Tereftalato (PET) reciclado, con la finalidad de darle mayor resistencia y deformabilidad sin agrietarse para su uso en cierto tipo de estructuras térreas.

Inicialmente se pensó en usar este suelo mejorado con fibra de PET en terraplenes para carreteras, pero se investigó la normatividad existente y se comprobó que no es apto usar limos en este tipo de estructuras. Posteriormente se planteó su uso como bordos para lagos, ríos y estructuras de retención desplantadas en suelos blandos, y de acuerdo a las normas existentes y a la práctica se comprobó que los limos son aptos para este tipo de estructuras.

En esta investigación se hicieron pruebas triaxiales estáticas con diferentes porcentajes de fibra de PET (0%,0.3%,0.6% y 1% con respecto al peso del suelo), y varios confinamientos (0.5 kg/cm², 1.0 kg/cm², 1.5 kg/cm²). En total se elaboraron 24 probetas para las pruebas estáticas.

La resistencia se incrementó apreciablemente al usar fibra de PET como material de refuerzo. Una observación que se debe de resaltar es que la falla en las probetas ensayadas se dio únicamente por la deformación acumulada.

Hasta cierta cantidad adicionada de fibras de PET y a mayor confinamiento inducido en la cámara triaxial el suelo presenta mayor resistencia. Es necesario considerar que existe una limitación técnica por parte de la cámara triaxial usada, ya que esta registra hasta 80 kilogramos/cm² aproximadamente.

Finalmente se plantea una propuesta constructiva para bordos usando limos y fibra de Polietileno Tereftalato (PET). Se consultó a ingenieros que trabajan en la construcción de terraplenes para saber que tipo de maquinaria podría ser usada y si podían aportar alguna recomendación para el mezclado de fibra de PET con el suelo.

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN.....	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES	7
1 MARCO TEÓRICO	8
1.1 RESEÑA DE INVESTIGACIONES ANTERIORES	10
1.2 Métodos para el mejoramiento del suelo en campo	12
1.2.1 Compactación superficial	12
1.2.2 Estabilización de suelos con mezclas	12
1.2.3 Compactación profunda	13
1.2.4 Precarga	13
1.2.5 Inyecciones (grouting)	13
1.3 Polietileno tereftalato (PET)	15
1.3.1 Impacto ambiental del PET.....	18
1.3.2 PET y su situación en México.....	19
1.4 Conceptos.....	21
1.4.1 Contenido de humedad	21
1.4.2 Límites de Atterberg	22
1.4.3 Teoría de Mohr – Coulomb	22
1.4.4 Relación esfuerzo – deformación	25
1.5 Ensayo de compactación Proctor	26
1.6 Pruebas de compresión rápidas	27
1.7 Resistencia al corte de suelos cohesivos.....	29
1.7.1 Ensayes no drenados en suelos cohesivos saturados.....	29
1.8 Mezclado de inclusión – suelo	30
1.8.1 Mezclado en laboratorio.....	31
1.8.2 Mezclado en campo	32
2 Modelo teórico	35
2.1 Propiedades de los materiales	35
2.1.1 Suelo	35

2.1.2	Elemento de refuerzo	35
2.2	Datos generales del modelo	36
2.3	Procedimiento de las pruebas	38
2.3.1	Disgregación y tamizado	38
2.3.2	Determinación del límite líquido	38
2.3.3	Determinación del límite plástico	40
2.3.4	Determinación de la densidad de sólidos.....	41
2.3.5	Determinación del peso específico	42
2.3.6	Elaboración de especímenes remoldados	43
2.3.7	Prueba de compactación.....	46
2.3.8	Montaje en cámara triaxial	47
2.3.9	Prueba de compresión triaxial estática	48
3	RESULTADO DE LAS PRUEBAS.....	50
3.1	Clasificación del suelo	50
3.2	Densidad de sólidos.....	53
3.3	Peso específico.....	53
3.4	Curva de compactación	54
3.5	Criterio de Mohr – Coulomb.	56
3.5.1	Círculos de Mohr para suelo natural sin reforzamiento de fibras de PET.....	56
3.5.2	Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 0.3% de fibras de PET.....	57
3.5.3	Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 0.6% de fibras de PET.....	58
3.5.4	Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 1.0% de fibras de PET.....	¡Error!
	Marcador no definido.	
3.6	Comportamiento esfuerzo – deformación.	59
3.7	Módulos de elasticidad.	65
3.8	Resistencia.....	67
3.8.1	Porcentajes de deformación.	67
4	PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO	72
4.1	Introducción.....	72
4.2	Operaciones previas	72
4.3	Método constructivo	73

4.4	Comparativa de estabilidad y deformación del bordo con diferentes porcentajes de fibras de PET.	75
5	CONCLUSIONES	83
5.1	Pruebas de laboratorio:	83
5.2	Generales:	83
	BIBLIOGRAFIA	84
	Índice de figuras	86
	Índice de ecuaciones.....	88
	Índice de tablas	89

INTRODUCCIÓN

Cuando el material disponible para una obra presenta deficiencias en sus características mecánicas se puede recurrir en algunos casos a alguna técnica de mejoramiento. El mejoramiento de suelos consiste en modificar sus características físicas o químicas para distintos fines, como por ejemplo para cumplir con especificaciones de calidad solicitadas en el proyecto. Esto se puede hacer mediante la incorporación de materiales pétreos de bancos de material, aditivos o emulsiones, cemento portland y en este caso se propone el uso de fibras de PET reciclado.

Para determinar si un suelo cumple con las características mecánicas especificadas en el proyecto constructivo se deben hacer varias pruebas de laboratorio, como:

- Densidad de sólidos
- Límites de Atterberg
- Clasificación del suelo
- Determinación del peso específico del suelo
- Pruebas triaxiales

Cuando se obtienen los datos del tipo de suelo que se encuentra en el lugar de la construcción se toma la decisión de usarlo tal como está, desecharlo o mejorarlo. Si se toma la opción de mejorarlo existen varias formas de hacerlo, en esta tesis se propone la alternativa de mejorar un suelo limoso usando fibras recicladas de PET. Para estudiar las posibles mejorías en sus propiedades mecánicas que se obtienen en el suelo limoso al usar fibras de PET se realizaron las pruebas anteriormente mencionadas.

De acuerdo a entrevistas realizadas a ingenieros que trabajan en la construcción de bordos y terraplenes, el uso del PET como material para mejorar el suelo es desconocido en el medio, por lo cual ignoran sobre obras donde se haya usado y tampoco lo han usado ellos mismos. Es importante considerar que de acuerdo a la investigación realizada en la literatura técnica este tipo de mezcla no ha sido usado en construcción en otros lugares del mundo.

Debido a esto se propone un método constructivo usando maquinaria común en campo, de esta forma se trata de asegurar que el uso del PET reciclado no tenga un impacto económico alto para poder implementar el procedimiento constructivo planteado. Para esto, se analizaron factores como las dificultades que pueden existir para mezclar suelos con fibras de PET en campo y en laboratorio.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Preguntas:

1. ¿Cuál es la situación del PET reciclado en México?
2. ¿Qué efectos tendría usar PET reciclado en estructuras terreas?
3. ¿De qué manera se puede fomentar el uso del PET reciclado para estructuras terreas?
4. ¿Qué métodos constructivos existen para usar fibras de PET reciclado en estructuras terreas?
5. ¿Cuál sería el impacto ambiental después de usar PET reciclado en estructuras terreas?

Objetivos:

1. Investigar el uso de materiales alternativos para el refuerzo y mejoramiento de suelos arcillosos y limosos.
2. Presentar una alternativa para el reúso a gran escala de materiales de desecho a base de fibras derivadas del reciclaje del PET en obras geotécnicas.
3. Contribuir a reducir el volumen de los desechos vertidos en los rellenos sanitarios, alargando su vida útil y minimizando el impacto ambiental.
4. Plantear una metodología de diseño y construcción enfocada hacia los desarrollos futuros de la infraestructura del país.

Metas:

1. Implementar alternativas de refuerzo para el mejoramiento de suelos que promuevan el uso de materiales sintéticos de reúso en construcción disminuyendo el impacto ambiental asociado.
2. Plantear una alternativa que sirva para disminuir la cantidad de desechos sólidos no degradables en los rellenos sanitarios y prolongar la vida útil de estos.
3. Contribuir a la optimización del uso de los recursos energéticos, por medio del reciclaje de productos de desechados.
4. Realización de artículos para revista y congresos nacionales e internacionales.

JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES

Justificación

- Disminuir el impacto ambiental que tienen los desperdicios de PET
- Mejorar la calidad de las estructuras terreas con el uso de fibras de PET
- Fomentar el uso de derivados de PET reciclado en el mejoramiento de suelos.

Alcances

- Delimitar el rango del uso del PET en suelos limosos para estructuras terreas

1 MARCO TEÓRICO

Dentro de las primeras etapas del proyecto y de la construcción de una obra existe una muy importante que se refiere al adecuado conocimiento de las condiciones del subsuelo, en particular de su estratigrafía y propiedades mecánicas, para determinar si es adecuado para el tipo de obra que se proyecta o si requiere de mejoramiento. Hasta hace algunos años, los tratamientos de suelos en la construcción tenían solamente bases empíricas.

En la actualidad los conocimientos en este campo se basan en estudios sistemáticos, con fundamentos sólidos y corroborados mediante la experimentación. Por lo cual, el proceso de mejoramiento de suelos debe responder una pregunta fundamental: ¿Que método y equipo debe emplearse para obtener en un suelo las propiedades mecánicas que se especifique en un proyecto?

En general puede decirse que, de ser requerido los suelos pueden ser susceptibles del mejoramiento de sus características mecánicas, pero los procesos y costos pueden ser muy diferentes. Entre las mejoras que muchas veces se requieren en un suelo están el incremento de su compacidad (en el caso de los suelos granulares) y la reducción de susceptibilidad a cambios volumétricos (en los suelos arcillosos). Todo proceso de mejoramiento implica una doble acción sobre la estructura de los suelos: un rompimiento y cambio de la estructura original y la modificación del arreglo o acomodo de sus partículas.

En muchas construcciones el suelo se usa como apoyo de la estructura de cimentación, es por esto que para determinar el comportamiento de éste ante los cambios de esfuerzos provocados por la construcción es importante conocer sus propiedades y facilitar con ello la selección de los procedimientos constructivos más adecuados, además de que, si por las características del suelo se prevén problemas derivados de su comportamiento, pueden anticiparse soluciones para resolverlos.

Cuando el suelo se ocupa como material de construcción se deben aprovechar al máximo sus propiedades mecánicas, para obtener un mejor rendimiento y aprovechamiento en beneficio de la economía general de la obra. Sin embargo, si el suelo por utilizar no tiene las propiedades necesarias, existen métodos de mejoramiento para alcanzarlas hasta donde sea posible.

Esta alternativa debe evaluarse sobre todo cuando se trata de suelos con estructura abierta o suelta. La decisión de mejorar un suelo no es fácil de tomar; los parámetros económicos y técnicos que deben estudiarse son diversos. Los métodos de mejoramiento, guardan en general un estado de conocimiento y dominio tal que solo se pueden recomendar sobre la base de procedimientos de experimentación en campo y laboratorio.

Cuando se toma la decisión del método que se utilizará para el mejoramiento de un suelo, no solo se debe analizar la factibilidad constructiva, sino también la económica, es decir los insumos, costos, equipos y tiempos de ejecución.

Por otro lado la creciente demanda por parte de los consumidores ha impulsado de manera importante el desarrollo de nuevas tecnologías para el empaque y embalaje de diversos productos de consumo diario. La

industria del empaque y embalaje es una de las más importantes en nuestro país, de hecho, se ha identificado que participan con el 1.16% del PIB y el 10.3% del PIB manufacturero.

Los materiales comúnmente utilizados para el empaque y embalaje a nivel nacional y de exportación son el vidrio, el metal, el papel, el cartón y el plástico. De estos, el plástico ocupa un lugar importante dentro de la industria (844 mil toneladas anuales, 8.9 kg-año/persona), ya que posee características muy particulares que favorecen el manejo y distribución de productos, además de su alta resistencia a pesar de ser un material liviano. Estas características entre otras, han favorecido el desarrollo de esta industria, la mayor diversificación de los productos y por supuesto, su consumo.

En el caso particular del PET (Tereftalato de Polietileno), se tiene que es uno de los materiales más comúnmente utilizados en la industria embotelladora de bebidas y del embalaje por sus características muy particulares que favorecen la distribución, el almacenaje y la presentación de algunos productos. Derivado de los altos niveles de consumo de estos productos, se tiene también grandes cantidades de residuos.

1.1 RESEÑA DE INVESTIGACIONES ANTERIORES

Existen investigaciones anteriores para proponer el uso de fibras para el reforzamiento de suelos, a continuación se mencionan algunas.

- El concepto de refuerzo de suelo con fibras en una configuración aleatoria ha recibido una atención creciente desde hace algunas décadas (i.e. O. B. Andersland et al. 1979, Gray y Ohashi 1983, Gray y Al-Refai 1986, Maher y Gray 1990, Al-Refai 1991, Ranjan et al. 1996, Wang et al. 1997, Consoli et al. 1998, 2003, Ghavami et al. 1999m Ghiasian et al. 2004, Arvind Kumar et al. 2004 y Al-Akhras et al. 2008).
- Andersland et al. (1979) utilizó pulpa de fibra sintética con longitud de 1.6 mm y diámetro de 0.02 mm para reforzar un suelo compuesto por Caolinita y Arcilla. Concluyó que la adición de la fibra al espécimen conducía a una resistencia última a la compresión, a una deformación de falla y rigidez mayores.
- Gray y Al-Refai (1986), compararon el efecto de capas de fibra orientadas y de capas de fibras de orientación aleatoria, colocándolas en especímenes de arena seca y determinando su comportamiento esfuerzo-deformación. Ellos demostraron que para ambas configuraciones se presentaba un incremento en la resistencia al cortante máximo, en la deformación axial a la falla y en la mayoría de los casos una reducción limitada en la resistencia al corte residual asociada con el incremento del refuerzo.
- Maher y Gray (1990) investigaron el efecto de la presión de confinamiento, la granulometría del suelo (tamaño de partícula, forma y gradación) y las propiedades de la fibra (contenido, relación de aspecto y módulo de elasticidad) en la respuesta de especímenes reforzados, ensayados bajo carga estática. Concluyeron que la presión crítica de confinamiento es función de la relación de aspecto de la fibra, el tamaño del grano y la gradación del contenido de fibra y de la cantidad de granos de tamaño medio. Encontraron que el máximo incremento en la resistencia de una arena reforzada ocurre a esfuerzos de confinamiento menores que el del valor de la presión crítica. La presión de confinamiento crítico disminuye con el incremento en la relación de aspecto de la fibra (l/d).
- Al-Refai (1991) estudió el efecto de tres tipos de fibra en arenas finas y medianas. El concluyó que las fibras incrementan los esfuerzos principales máximos y que este incremento es proporcional a la longitud de las fibras.
- Ranjan et al. (1996) investigaron el efecto de las fibras sintéticas y naturales colocadas de forma aleatoria en suelos arenosos. Los resultados de sus ensayos indicaron que por debajo de la presión de confinamiento crítica las fibras tienden a deslizarse. La presión de confinamiento crítica es función de la relación de aspecto de la fibra. También concluyeron que la resistencia al corte del suelo reforzado se incrementa con la inclusión de fibra.

- Wang (1999) usó carpetas de fibras de desecho recicladas para reforzar el suelo y el concreto. El concluyó que estas incrementan la resistencia a la compresión y la ductilidad. También observó que los especímenes exhibieron un incremento significativo en la resistencia máxima, cercano al 303%.
- Ghavami et al. (1999) introdujeron la aplicación de fibras de coco como material de refuerzo dentro del suelo. Ellos encontraron que la resistencia del espécimen reforzado se incrementó en un 4% con un contenido ligero de fibra pero la ductilidad creció de manera significativa, en la cual la deformación a la falla se incrementó de 4% a 25%.
- Consoli et al. (2003) utilizaron fibras de polipropileno de diferentes longitudes y diámetros y varios contenidos de fibra para reforzar suelos arenosos. También concluyeron que con las fibras largas, los especímenes de suelo mostraron un comportamiento más resistente al final de los ensayos. Ellos también concluyeron que los esfuerzos desviadores se incrementaron con la longitud de la fibra, relación de aspecto de la fibra y contenido, mientras que decreció con el incremento del diámetro de la fibra.
- Ghiassian et al. (2004) realizó una serie de ensayos triaxiales a compresión en especímenes reforzados de suelo arenoso con lechos de fibras recicladas en forma de pequeñas tiras. Ellos concluyeron que la inclusión de estas tiras resultó en un incremento de la resistencia máxima y última a compresión y en la ductilidad de los especímenes de arena.
- Kumar et al (2006) investigaron el efecto de la adición de fibras de poliéster dentro de arcillas suaves. Realizaron ensayos de compresión inconfiada. Ellos reportaron que se presentó un incremento en la resistencia a la compresión inconfiada de la arcilla debido a la adición de las fibras de poliéster.
- Al-Akharas (2008) investigó el efecto de las fibras naturales y sintéticas en la expansión de los suelos arcillosos. Concluyó que un incremento en el contenido de fibra de ambos tipos disminuía el potencial de expansión de los suelos arcillosos de forma significativa.

1.2 Métodos para el mejoramiento del suelo en campo

Existen varios métodos para mejorar el suelo, a continuación se mencionan los más comunes:

1.2.1 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.

1.2.2 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

1.2.3 Compactación profunda

Existen diversos tipos, como:

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

1.2.4 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.

1.2.5 Inyecciones (grouting)

Variantes:

- 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:

1. Mejorar la resistencia y reducir la deformabilidad de la formación: Inyecciones de "consolidación"
2. 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

1.3 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.

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.

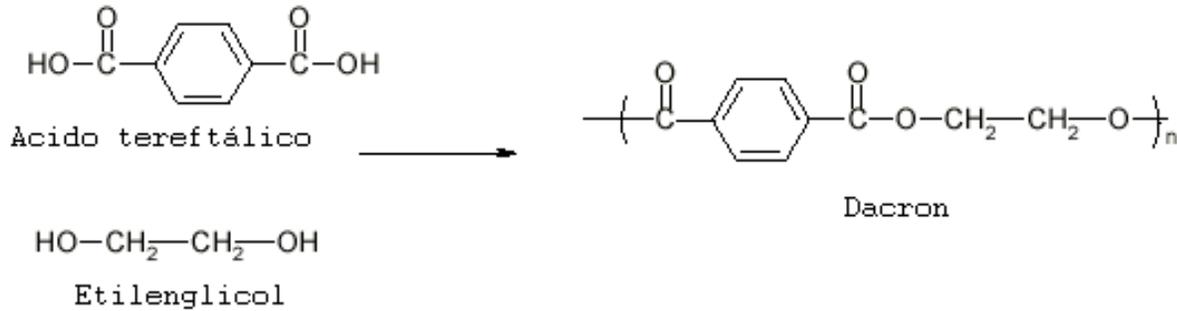


FIGURA 1.1 Formula química del PET

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.



FIGURA 1.2 Whinfield y Dickson, inventores de la fibra de PET.

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.

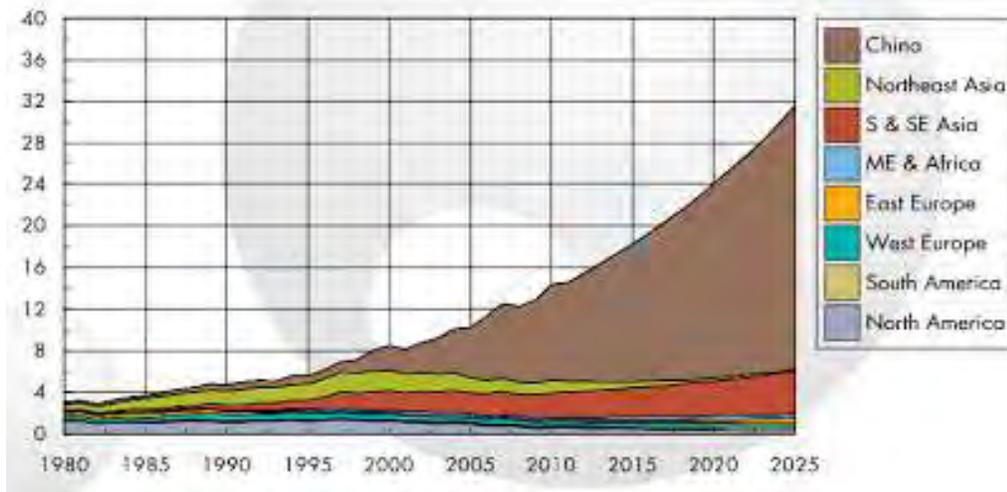
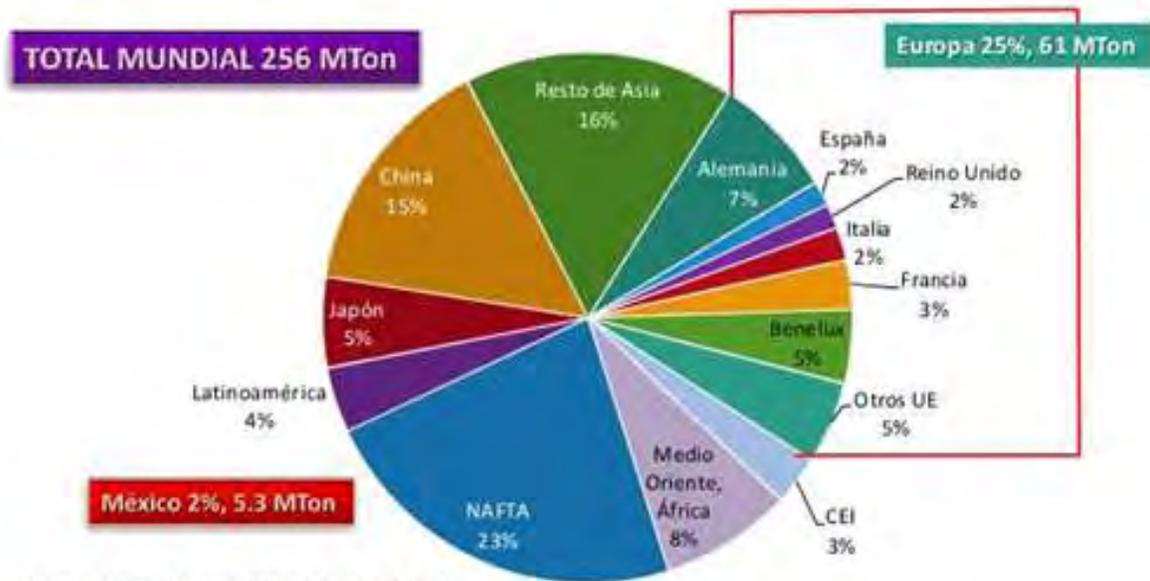


FIGURA 1.3 Producción mundial de poliéster de fibra cortada histórico y estimación futura

Producción Mundial de Plásticos por país y Región



Fuente: Plastics Europe Market Research Group

FIGURA 1.4 Producción mundial de plásticos por país y región

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 CO₂, O₂ 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.

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.



FIGURA 1.5 Usos y aplicaciones del PET

Como se puede ver en la FIGURA 1.5 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.

1.3.1 Impacto ambiental del PET

El Tereftalato de Polietileno (PET) puede ser degradado mediante diferentes métodos: proceso químico y proceso natural. Siendo el químico, el método que puede hacer un rehuso del material para un nuevo producto, como obtención de combustibles entre otras cosas. Esto es debido a que puede ser modificada su estructura molecular. El proceso natural puede tardar mucho tiempo debido a la de vida del PET, lo cual conduce que pueda tardar en degradarse aproximadamente en 500 años o más.

El consumo global del PET se calcula en 12 millones de toneladas anuales con un crecimiento anual de 6%. El problema ambiental radica en que tan sólo 20% del PET que se consume en el mundo se recicla, el resto se dispone en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto.

1.3.2 PET y su situación en México

Las botellas de PET llegaron a México a mediados de la década de 1980 con gran aceptación entre los consumidores. De acuerdo con el gobierno del Distrito Federal y la consultora de mercados Canadean se estima que México ocupa el segundo lugar en consumo de PET a nivel mundial.

En México, el principal uso de los envases de PET lo llevan las botellas de refresco, con más del 50%, seguido del agua embotellada (17%).

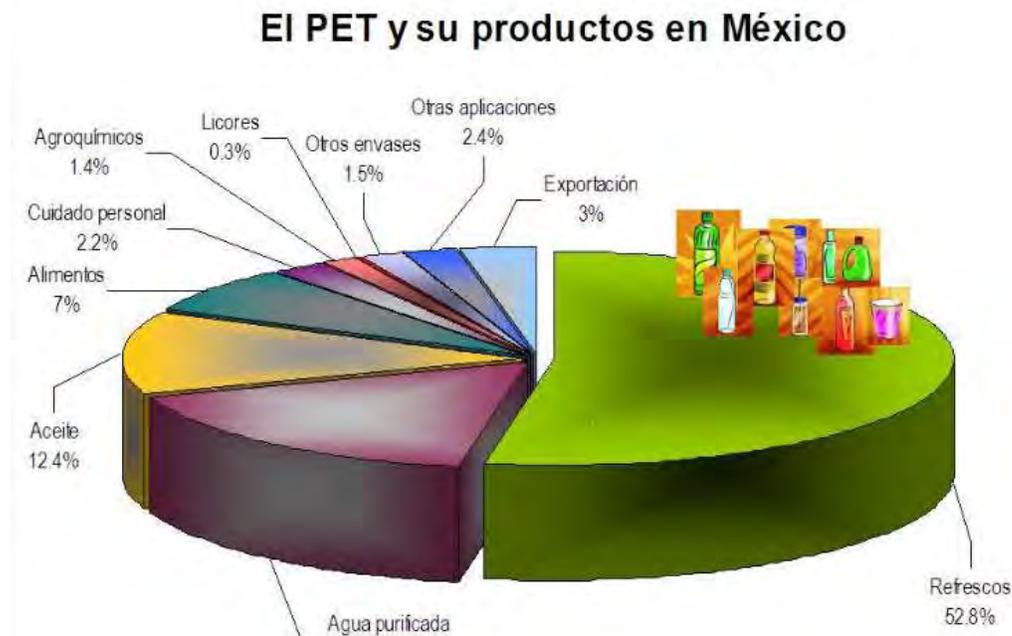


FIGURA 1.6 El PET y sus productos en México

Para abastecer la demanda de botellas de PET en México, existen 5 plantas productivas y alrededor de 190 plantas embotelladoras, que atienden a casi un millón de puntos de venta.

Una vez que son usados, la mayoría de los envases de PET son dispuestos en rellenos sanitarios, cauces, calles o tiraderos clandestinos. Los residuos de PET representan entre el 2-5% del peso y 7-10% del volumen en los rellenos sanitarios, y entre 25 y 30% de los residuos sólidos municipales generados en el país.

De acuerdo con RECIMEX (FIGURA 1.7) en México se recicla alrededor de 15% del PET que se consume. Este fenómeno se asocia con el precio al que se compra un kilogramo de PET que es de tan solo \$2 pesos, mientras que el kilogramo de aluminio se compra en \$9 pesos. El reciclaje del aluminio oscila en 50%.

PET (MXN/kg)		
Tipo	Menudeo	Mayoreo
PET post-consumo a granel mixto	1.88	4.03
PET post-consumo en pacas mixto	3.76	6.44
PET hojuelas limpias natural	7.25	12.08
PET pellets natural	12.08	16.11

PET para reciclaje y reciclado al 9 de abril de 2013.

FIGURA 1.7 Precio del P.E.T. reciclado

DATOS DEL PET EN MÉXICO

- En el Valle de México se consumen cada día 600 toneladas de PET.
- Un 52% de los materiales plásticos se destinan a la fabricación de embalajes y envases.
- Los envases representan 30% de los desechos domésticos.
- Los envases de PET ocupan un 5% del peso y 40% de los rellenos sanitarios.
- Cada mexicano consume 7 kg de PET al año.
- 80% del PET se exporta a China, Estados Unidos y otros países latinos.
- La generación de PET en México se incrementa 7% al año.
- Anualmente, en promedio, 90 millones de botellas de refrescos y agua purificada son lanzadas a las vías públicas, bosques y playas de México.

1.4 Conceptos

1.4.1 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:

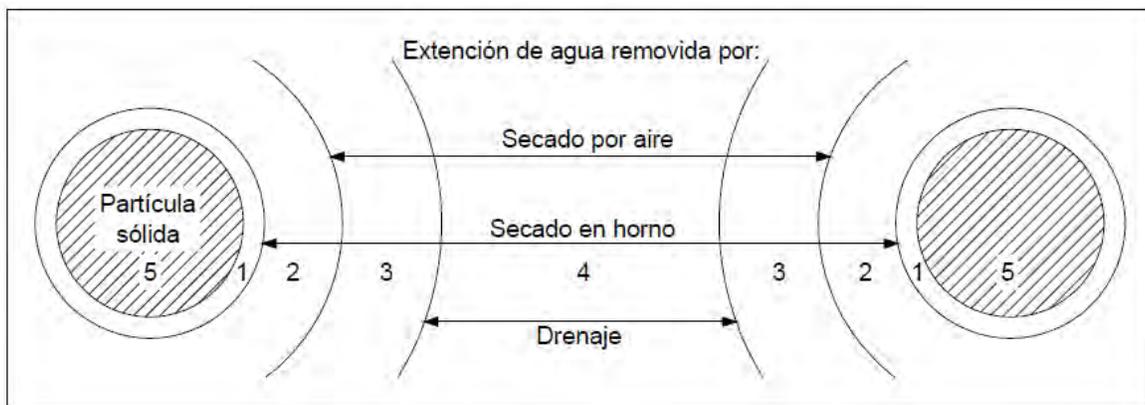


FIGURA 1.8 Agua en una partícula arcillosa

1. Agua absorbida, retenida en la superficie de la partícula por grandes fuerzas de atracción eléctrica y virtualmente en un estado sólido. Esta capa es de un espesor muy pequeño, del orden de $0.005\mu\text{m}$. Esta agua no se puede remover por secado en horno a 110°C , por lo que se considera parte del grano del suelo sólido.
2. Agua que no está fuertemente retenida y puede ser removida por secado en horno, pero no por secado al aire (humedad higroscópica)
3. Agua capilar, retenida por tensión superficial, generalmente removible por secado al aire.
4. Agua gravitacional, la cual se puede mover entre los espacios vacíos de los granos del suelo, se remueve por drenaje.
5. 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 $105-110^{\circ}\text{C}$. 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 1.1 Contenido de humedad

1.4.2 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)

1.4.3 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 1.2 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:

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

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

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

Ecuación 1.3 Envolvente de falla

Siendo σ_1 : el esfuerzo principal mayor y σ_3 el esfuerzo principal menor.

τ_m : Esfuerzo tangencial

Φ : Angulo de

σ_m : Esfuerzo

Para el criterio de Mohr – Coulomb (FIGURA1.9) 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.

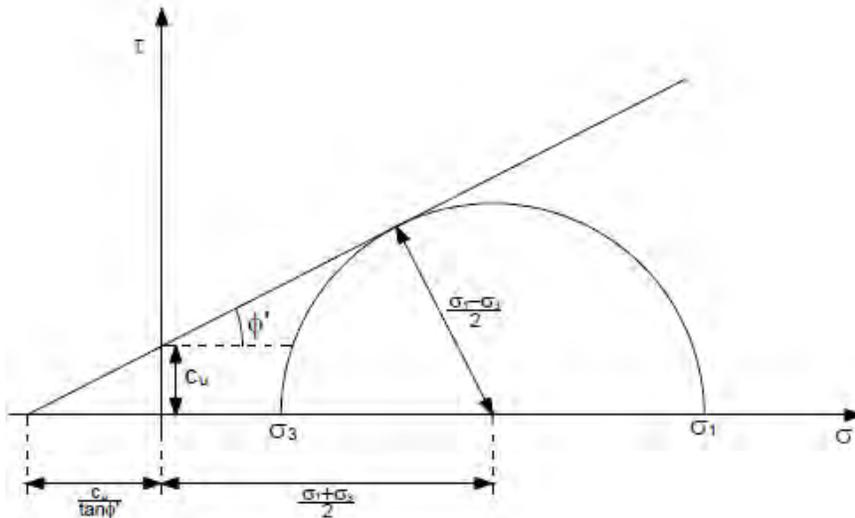


FIGURA 1.9 Círculo de Mohr-Coulomb

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 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:

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

Ecuación 1.4 Esfuerzo efectivo

Donde:

σ : esfuerzo total

σ' : 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 1.5 Esfuerzo efectivo.

En la cual los parámetros c_u' y ϕ' 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:

- 1) 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.
- 2) 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 ($\phi=0$).
- 3) Suelos cohesivos-friccionantes: los cuales poseen cohesión tanto como fricción.

1.4.4 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 de las características del depósito de suelo, del material y del tipo de obra.

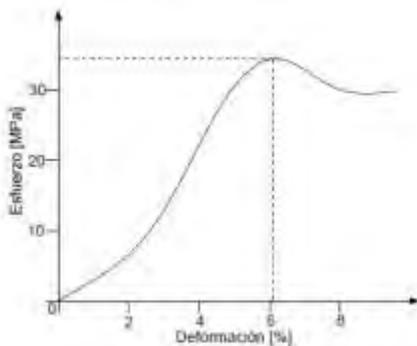


FIGURA 1.10 Curva de esfuerzo deformación

1.5 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 D-1557). 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. En el ensayo Proctor, la energía específica (Ee) está dada por:

$$Ee = \frac{n * N * W * h}{V}$$

Ecuación 1.6 Energía específica

Donde:

Ee: Energía específica (Kg*cm/cm³).

V: volumen de la muestra (cm³)

n: número de golpes.

N: número de capas

W: peso del pistón (kg)

h: altura de caída del pistón (cm)

1.6 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 ensaye 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:

- a) Falla plástica, en la cual el espécimen experimenta una deformación lateral (en forma de barril) sin la generación de fisuras.
- b) Falla frágil, donde el espécimen experimenta una fisura diagonal, debido a los esfuerzos cortantes sobre una o más superficies bien definidas.
- c) Falla intermedia o compuesta donde también el espécimen experimenta fisuras.

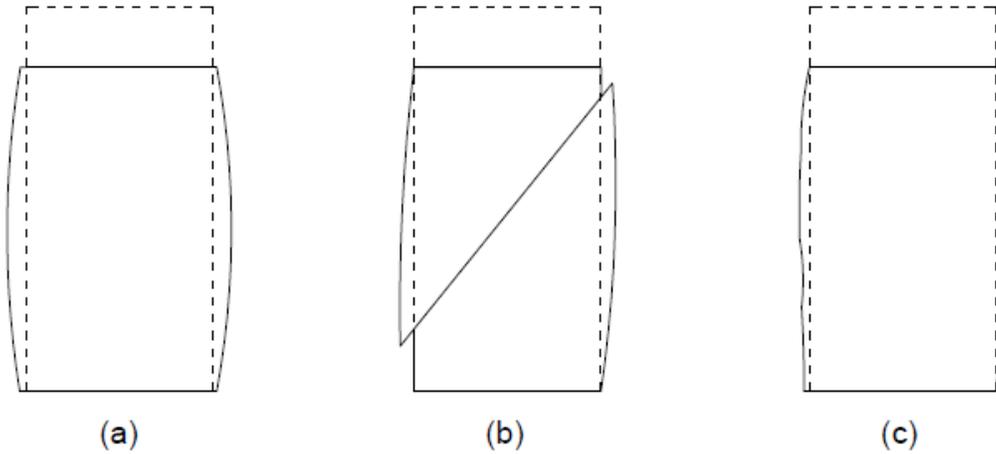
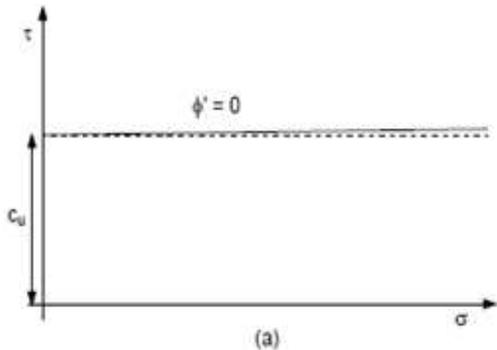


FIGURA 1.11 Tipos de falla a) Falla plástica, b) Falla frágil y c) Falla intermedia

1.7 Resistencia al corte de suelos cohesivos

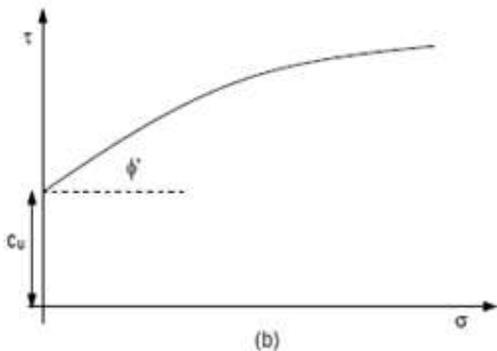
Lo ideal es determinar parámetros del suelo por medio de pruebas triaxiales con especímenes inalterados. La resistencia al corte de los suelos cohesivos depende de diferentes factores, tales como su composición mineralógica, tamaño de las partículas, forma, textura, estructura de los granos y su contenido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

1.7.1 Ensayos no drenados en suelos cohesivos saturados



Debido a la baja permeabilidad de los suelos finos, se puede decir que no hay drenaje en un ensaye de resistencia al corte rápido (20 minutos).

Sí sólo se miden esfuerzos totales sin tomar en cuenta las presiones de poro, la resistencia al corte de los suelos finos saturados no drenados es independiente de los esfuerzos normales aplicados.



Las pruebas de corte rápidas bajo diferentes presiones normales presentan una envolvente de falla similar a la Figura (a), donde la curva se observa horizontal (ϕ es cercano a cero), y donde intercepta con el eje de los esfuerzos cortantes es el esfuerzo cortante no drenado ó la cohesión aparente, denotada por c_u . Bajo estas condiciones se observa que la resistencia al corte deriva completamente de la cohesión, la cual se puede obtener por una sola medición.

Una prueba de corte rápida sobre una arcilla sobre-consolidada nos da una envolvente ligeramente curvada como la indicada en

la Gráfica (b).

FIGURA 1.12 Envolventes representativas de Coulomb para pruebas de corte rápidas: (a) Arcilla saturada, (b) Arcilla sobre consolidada.

1.8 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, del 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.

El contenido de la fibra de refuerzo (q) está definido por:

$$q = \frac{W_f}{W}$$

Ecuación 1.7 Contenido o concentración de la fibra de refuerzo

Donde:

W_f : es el peso de las fibras

W : es el peso del suelo seco en horno.

1.8.1 Mezclado en laboratorio

El mezclado del suelo con fibras de PET realizado en laboratorio presenta limitaciones para contenidos de fibra superiores al 1%, debido a que se forman grumos. Por esta razón, se decidió no sobrepasar $q=1\%$ 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 forma 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.



FIGURA 1.13 Resultado de la técnica de mezclado #3

1.8.2 Mezclado en campo

En esta tesis se describirá un procedimiento constructivo usando fibras de P.E.T. con suelo. Fernández Loiza 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. El grado de disgregación que se ha considerado necesario es el siguiente:

Malla	% mínimo que debe pasar
1"	100
No. 4	85
No. 10	65

FIGURA 1.14 Grados de disgregación (J.L. Escorio 1964)

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 revolvedoras 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/cm² para suelos limosos o finos sin cohesión, de 7 a 14 kg/cm² 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.

2 Modelo teórico

2.1 Propiedades de los materiales

En este estudio se utilizan dos materiales: Fibras de Polietileno Tereftalato (PET) como elemento de refuerzo y suelo fino. La descripción de cada material se detalla en los puntos siguientes.

2.1.1 Suelo

El suelo utilizado para este estudio se obtuvo de 4 muestras proporcionadas por el Instituto de Ingeniería, extraídas en la zona de Texcoco a una profundidad de 4 y 6 m aproximadamente.

Las muestras fueron clasificadas previamente en campo como suelo fino.

Estas muestras fueron disgregadas y secadas en horno para poder tener mejor manejo, después fueron disgregadas nuevamente y tamizadas únicamente por la malla #60 con el fin de quitar gravas y sales.

2.1.2 Elemento de refuerzo

Se utilizaron fibras de Polietileno Tereftalato como elemento de refuerzo. Las fibras fueron proporcionadas por la empresa Tecnología de Reciclaje S.A. de C.V. y cuentan con las siguientes características:

<u>Tipo de fibra</u>	<u>Color</u>	<u>Longitud</u>	<u>Diámetro</u>	<u>Punto de fusión</u>	<u>Resistencia química</u>
15x50 SIL	Marfil	50 mm	15 μ m	255 °C	Excelentes condiciones alcalinas

Tabla 2.1 Descripción de la fibra de PET

2.2 Datos generales del modelo

Se realizaron pruebas triaxiales UU (no consolidada, no drenada) con probetas remoldadas reforzadas para analizar el comportamiento del suelo con diferentes confinamientos (0.5 kg/cm^2 , 1.0 kg/cm^2 , 1.5 kg/cm^2) y diferentes porcentajes de fibra PET (0%, 0.3%, 0.6% y 1%).

La cantidad de fibra con respecto al peso del suelo fue elegida teniendo como base pruebas anteriores. En la tesis de licenciatura de Sherwell Betancourt, Guillermo Francisco (2014) "Estudio del uso de Polietileno Tereftalato (PET) como material de refuerzo de estructuras térreas conformadas por suelo fino" menciona que la mejora del suelo se obtuvo dentro del rango 0.1% - 1.0%. Además para cantidades mayores al 1.0% el mezclado del suelo con la inclusión de fibras discretas se vuelve bastante complicado.

Se elaboraron las pruebas de caracterización y propiedades índice del suelo. Posteriormente las pruebas triaxiales estáticas en las que se ensayaron 12 probetas con diferentes condiciones y otras 12 probetas adicionales para corroborar los valores obtenidos en las primeras.

La relación altura/diámetro de la probeta remoldada reforzada es $h/d \approx 2.36$, la cual está dentro del rango que solicita la norma ASTM. Siendo su diámetro de 3.6 cm y su altura de 8.5 cm.

Para la elaboración de las probetas se utilizó un pistón con un peso de 196.39 gr con una altura de caída de 26 cm. Las probetas tenían 9 capas de suelo, a las cuales se les aplicó 24 golpes por cada una. De esta forma los golpes abarcaban toda el área transversal de la misma.



FIGURA 2.1 a) Pistón desarmado

b) Molde partido desarmado

c) Molde partido armado

Se usó la siguiente ecuación para determinar la energía específica por capa de las probetas:

$$Ee = \frac{n * N * W * h}{V}$$

Ecuación 2.1 Energía específica para probetas.

Sustituyendo las variables:

$$Ee: \frac{(24)*(9)*(0.19639)*(26)}{91.61} = 12.04 \quad \text{kg*cm/cm}^3$$

Se decidió que la humedad en las probetas formadas fuera del 41% de humedad para efectos prácticos, ya que la humedad óptima es de 40.64%.

Para observar el comportamiento de las probetas conformadas con suelo natural y fibras de P.E.T. se hicieron pruebas triaxiales UU con diferentes presiones de confinamiento para simular los esfuerzos horizontales que tendría el suelo a diferentes profundidades. Así mismo, para las probetas que solo estaban conformadas de suelo natural. Los confinamientos fueron los siguientes:

- Confinamiento de 0.5 kg/cm² equivalente a 1.98 m de profundidad.
- Confinamiento de 1.0 kg/cm² equivalente a 3.97 m de profundidad.
- Confinamiento de 1.5 kg/cm² equivalente a 5.95 m de profundidad.

2.3 Procedimiento de las pruebas

2.3.1 Disgregación y tamizado

Debido a que la disgregación de un suelo fino hecha manualmente se vuelve complicada para un tamaño de partícula menor a $250\ \mu\text{m}$, se decidió que el suelo utilizado debería pasar únicamente la malla #60 con el fin de obtener un material homogeneizado para la conformación de las probetas.

Para empezar con el disgregado del suelo, éste debe de estar seco y solamente con la humedad ambiental, con el fin de facilitar la disgregación y evitar el levantamiento de polvo al manejar el suelo. Con ayuda de un mortero no poroso se empieza a disgregar el suelo y se vierte sobre la malla #60, generando pequeñas vibraciones para que logre un mejor tamizado. Este proceso se repite generalmente de 4 a 5 veces hasta que el suelo pasa en su totalidad.



FIGURA 2.2 Cribado del suelo a través de malla #60



FIGURA 2.3 Suelo cribado por malla #60

Cuando existen fibras de PET en el suelo que se quiere disgregar, se sigue el procedimiento mencionado y se retiran las inclusiones de fibra de PET.

2.3.2 Determinación del límite líquido

El procedimiento para obtener el contenido de humedad es el siguiente:

- 1) En una capsula de vidrio no poroso se ponen aproximadamente 160 gr del suelo que pasa la malla #60. Con ayuda de una espátula se mezcla el suelo con agua destilada hasta que quede totalmente saturado y homogéneo. Se deja curar el suelo para que entre las fases líquida y sólida exista homogeneidad.
- 2) Se ubica la copa de Casagrande sobre una base firme. Con la espátula se coloca dentro de la copa una porción de la muestra. La masa de suelo se centra en el punto de apoyo de máximo espesor. El material excedente se reincorpora al plato de evaporación.
- 3) Se divide la masa de suelo con el acanalador de Casagrande cuidadosamente a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la copa, de modo que se forma una ranura clara y bien delineada. Se pasa el acanalador, manteniéndolo perpendicular a la superficie interior de la copa; en

ningún caso debe existir desprendimiento de la pasta del fondo de la copa; si ello ocurre, se retira todo el material y se reinicia el procedimiento.

4) Se gira la manivela levantando y dejando caer la copa con una frecuencia de dos golpes por segundo hasta que las paredes de la ranura entre en contacto con el fondo del surco a lo largo de un tramo de 10 mm; si el cierre de la ranura fue irregular se descarta el resultado

5) Se registra del número de golpes (N)

6) Se retira aproximadamente 10 gr del material que se junta en el fondo del surco; colocando en una cápsula de secado y se determina su humedad (W)

7) Se coloca el material que quedó en la copa al plato de evaporación; se lava y seca la copa junto con el acanalador de Casagrande y se coloca en su sitio.

8) Se continúa batiendo con la espátula la pasta de suelo que quedó en el plato de evaporación para obtener un secado homogéneo. Se repiten las operaciones precedentes desde que se cierra la ranura con 20 golpes en adelante para dar origen a un nuevo punto.

9) El ensaye requiere al menos de cinco puntos para el trazado de la curva de fluidez.

10) En una gráfica semi logarítmica, con la humedad (W) como ordenada en escala aritmética y el número de golpes (N) como abscisa en escala logarítmica, se dibujan los puntos correspondientes a los resultados obtenidos.

11) Se traza una línea recta que pase lo más aproximado posible por los puntos. Se obtiene el límite líquido (LL) como la humedad correspondiente con la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes, aproximando a un decimal.



FIGURA 2.4 Copa casa grande

2.3.3 Determinación del límite plástico

El límite plástico corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3 mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0.5 a 1 cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos.

El procedimiento para obtener el contenido de humedad es el siguiente:

- 1) Se colocan sobre el plato de evaporación de vidrio no poroso aproximadamente 40 gr del suelo utilizado para la obtención del límite líquido.
- 2) Se reduce la humedad si es necesario mediante revoltura con la espátula, hasta que la pasta sea suficientemente plástica para moldearla como una esfera.
- 3) Se toma una porción de la muestra de ensaye acondicionada de aproximadamente 1 cm^3 , amasando la muestra entre las manos; luego se hace rodar sobre el plato de evaporación, ejerciendo una leve presión con la palma de la mano hasta conformar un cilindro. Cuando el cilindro alcance un diámetro aproximadamente de 3 mm se dobla y amasa, para conformar el cilindro nuevamente.
- 4) Se repite la operación manteniendo la velocidad y la presión de amasado, hasta que el cilindro se disgregue al llegar a un diámetro de aproximadamente 3 mm, en trozos de orden de 0.5 a 1 cm de largo y no pueda ser reamasado ni reconstituido.
- 5) Se reúnen las fracciones del cilindro disgregado y se colocan en una cápsula de secado, previamente tarada. Se determina y se registra el contenido de humedad (w) aproximando a un decimal.
- 6) Se repiten las etapas anteriores con dos porciones más de la muestra de ensaye.
- 7) Finalmente se calcula el límite plástico (PL) como el promedio de las tres determinaciones efectuadas sobre la muestra de ensaye, aproximando a un decimal. Las determinaciones no deben diferir entre sí en más de dos puntos; se deben considerar dudosos los resultados si difieren en más del 10%; cuando no se cumpla esta condición, repita todo el ensaye.



FIGURA 2.5 Determinación de límite líquido

2.3.4 Determinación de la densidad de sólidos

La densidad de sólidos (GS) es una propiedad índice que interviene en la mayor parte de los cálculos relacionados con la mecánica de suelos.

Una de las aplicaciones más comunes de la densidad, es la obtención del volumen de sólidos. Para la determinación de la densidad de un suelo fino se realizaron los siguientes pasos:

- 1) Se selecciona una parte del suelo fino utilizado (entre 50 y 100 gr), los cuales se deberán dejar en una cápsula llena de agua destilada por 24 horas para que se saturen completamente.
- 2) A las 24 horas se vierte el contenido de la cápsula (suelo con agua destilada) a un matraz aforado con cuello estrecho, empleando para esto un embudo. Si quedan partículas en el embudo, se limpia éste con agua destilada.
- 3) Se extrae el aire atrapado en el suelo, empleando una bomba de vacíos. Para ayudar a la extracción del aire, se agita ligeramente el matraz. Este procedimiento se realiza mientras el matraz se coloca en baño maría.
- 4) Se retira el matraz de la bomba de vacíos y del baño maría una vez que deje de ebullición el agua dentro del matraz.
- 5) Se completa la capacidad del matraz con agua destilada hasta la marca de aforo, de tal manera que la parte inferior del menisco coincida con la marca de aforo. Se secan los residuos de agua que queden en el cuello del matraz. Se deja reposar 24 horas.
- 6) Se toma el peso del matraz (matraz + agua + suelo) con mínimo un decimal.
- 7) Se toma la temperatura de la suspensión, para con ella entrar a la curva de calibración del matraz y obtener el peso del matraz + agua hasta la marca de aforo. Así obteniendo el volumen de agua que cabría dentro del matraz.
- 8) El contenido dentro del matraz (sin dejar residuos de suelo) se vacía a una charola previamente tarada para meterla a un horno con 105°C de temperatura, dejando la charola dentro del horno por 24 horas, hasta que se evapore completamente el agua.
- 9) Se toma el peso de la charola con el suelo, con mínimo un decimal.
- 10) Se obtiene el peso de los sólidos y el volumen de sólidos para finalmente obtener la densidad de sólidos (GS).

11) Todos los pasos anteriores se realizan de nuevo con otra selección de suelo. Se obtiene la media de ambas densidades de sólidos.



FIGURA 2.6 Equipo para determinar densidad de sólidos

2.3.5 Determinación del peso específico

El peso específico sirve para saber el peso por m^3 de suelo, para esta prueba se realiza el siguiente método:

- 1) Se toma una muestra inalterada del suelo.
- 2) Se labra un cubo de dimensiones 4cm X 5cm X 6cm
- 3) Se pesa el cubo en una báscula y se registra el peso obtenido.
- 4) Se calienta cera hasta hacerla líquida y se le da un baño de cera al cubo para que al pesar el cubo en agua no absorba agua y este aumente su peso.
- 5) Se pesa el cubo bañado en cera y se registra su peso.
- 6) Se pesa el cubo con cera en agua.
- 7) Se multiplica el volumen del cubo por el peso del mismo en agua y se obtiene el peso en kilogramos $\times m^3$



FIGURA 2.7 Espécimen para determinar peso específico

2.3.6 Elaboración de especímenes remoldados

Caso A. Para la elaboración de especímenes sin refuerzo con fibra de PET se prosigue de la siguiente manera:

- 1) Se obtiene el suelo ya disgregado y tamizado por la malla #60.
- 2) El suelo se mete al horno sobre una charola de acero inoxidable hasta que esté completamente seco.
- 3) Se saca la charola con el suelo del horno y se introduce al desecador hasta que se enfríe (no se hacen mediciones de peso debido que con el calor de la muestra existe cavitación, produciendo un error en las mediciones) para evitar que el suelo tenga una mayor absorción de humedad ambiental.
- 4) Sobre otra charola metálica, a temperatura ambiente, se pesan 120 gramos del suelo seco. Se agregan 50 gramos de agua. (Se requieren 49.2 gramos de agua para obtener la humedad óptima, sin embargo existe evaporación y se agrega un poco más de agua).



FIGURA 2.8 Material cribado por malla #60

- 5) Se mezcla manualmente con la espátula mediana la muestra evitando la formación de grumos hasta que exista homogenización.
- 6) Existirá una evaporización del agua, por lo que se vuelve a pesar la muestra.
- 7) Se tapa la bandeja metálica con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad de la mezcla.

- 8) En 10 cápsulas de vidrio (la décima sirve de repuesto) dividiendo el peso total entre las 10 capsulas, tapando con otra franela húmeda las cápsulas con muestra para evitar pérdida de humedad.
- 9) Se arma el equipo de compactación. En la base interna se pone un acetato de forma circular con diámetro igual al interno del molde, de la misma forma que se cubre con acetato la pared interna del molde para evitar succión del agua del espécimen al momento de sacarlo del molde (se toman las medidas internas del molde con acetato para el volumen total de la probeta). Para evitar deformaciones en el molde, se ajusta con un anillo sin fin, al igual que con otro anillo se mantiene la unión entre el molde y su cresta.
- 10) Una vez armado el molde se coloca la primera capa del espécimen. Posteriormente se le aplica energía al suelo con 24 caídas con el pisón en diferentes puntos siguiendo la secuencia:

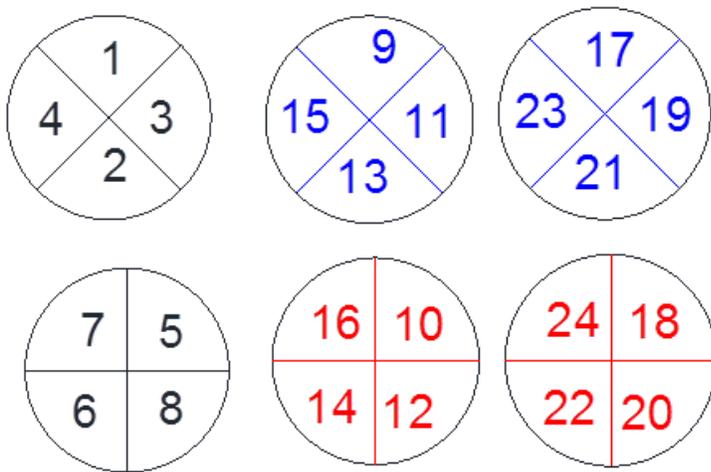


FIGURA 2.9 Representación gráfica de golpes dados con el pisón para formar probetas

El pisón tiene una forma de un cuarto de círculo y de esta manera es como se aplican los golpes en la probeta.

- 11) Con cuidado se quita la cresta del equipo de compactación para evitar la succión y agrietamiento del espécimen. Se retira el suelo sobrante del molde con la espátula chica raspando en medio del molde hacia afuera.
- 12) Se retira la base y paredes metálicas del molde al igual que la base y pared de acetato, obteniendo la probeta.
- 13) Con un manejo cuidadoso se toma el peso de la probeta con el fin de determinar el contenido de humedad (hacerlo lo más rápido posible para evitar pérdidas en el contenido de humedad).

Caso B. Para especímenes con adición de fibras aleatoriamente distribuidas se prosiguió de la siguiente manera:

- 1) Se obtiene el suelo ya disgregado y tamizado por la malla #60.
- 2) El suelo se mete al horno sobre una charola de acero inoxidable hasta que esté completamente seco.
- 3) Se saca la charola con el suelo del horno y se introduce al desecador hasta que se enfríe (no se hacen mediciones de peso debido que con el calor de la muestra existe cavitación, produciendo un error en las mediciones) evitando que el suelo tenga absorción de humedad ambiental.
- 4) Se pesa el porcentaje de fibra con respecto al peso del suelo seco (0.3%, 0.6% y 1.0%) y se coloca sobre la charola metálica.
- 5) Una vez que la fibra esté en la charola, se pesan 120 gramos del suelo seco (a temperatura ambiente. Se agregan 50 gramos de agua. (Se requieren 49.2 gramos de agua para obtener la humedad optima, sin embargo existe evaporación y se agrega un poco más de agua).
- 6) Se mezcla manualmente con la espátula mediana la muestra, ayudándose con la espátula chica, evitando la formación de grumos hasta que exista homogenización.
- 7) Existirá evaporación del agua, por lo que se vuelve a pesar la muestra.
- 8) Se tapa la bandeja metálica con una franela húmeda para evitar la pérdida de agua de la mezcla.
- 9) En 10 cápsulas de vidrio (la décima sirve de repuesto) dividiendo el peso total entre las 10 capsulas, tapando con otra franela húmeda las cápsulas con muestra para evitar pérdida de humedad.
- 10) Se arma el equipo de compactación. En la base interna se pone un acetato de forma circular con diámetro igual al interno del molde, de la misma forma se cubre con acetato la pared interna del molde para evitar succión del agua del espécimen al momento de sacarlo del molde (se toman las medidas internas del molde con acetato para el volumen total de la probeta). Para evitar deformaciones en el molde, se ajusta con un anillo sin fin, al igual que con otro anillo se mantiene la unión entre el molde y su cresta.
- 11) Una vez armado el molde se coloca la primera capa del espécimen. Posteriormente se le aplica energía al suelo con 24 caídas con el pisón en diferentes puntos siguiendo la secuencia de la figura 2.9.
- 12) Con cuidado se quita la cresta del equipo de compactación para evitar la succión y agrietamiento del espécimen. Se retira el suelo sobrante del molde con la espátula chica, raspando de en medio del molde hacia afuera (quedarán parte de las fibras libres después del raspado, no se deben retirar).

13) Se retira la base y paredes metálicas del molde, al igual que la base y pared de acetato, obteniendo la probeta.

14) Con un manejo cuidadoso se toma el peso de la probeta con el fin de obtener el contenido de humedad (hacerlo lo más rápido posible para evitar pérdidas en el contenido de humedad).

Se hicieron varias probetas hasta lograr una del tamaño del molde partido.

Primero se intentó usar 110 gr de suelo con diferentes porcentajes de humedad y una distribución en cada capsula de vidrio de 13 gr para cada capa de la probeta. Este intento fue fallido ya que no se podía completar la probeta de forma completa.

Después se usó 110 gr de suelo con diferentes porcentajes de humedad y una distribución en cada capsula de vidrio de 15 grs para cada capa de la probeta. Sin embargo esta prueba también fue fallida ya que la última capa era muy blanda y la probeta no alcanzaba a formarse totalmente.

Por último se emplearon 120 gr de suelo con diferentes porcentajes de humedad y una distribución en cada capsula de vidrio de 17 gr para cada capa de la probeta. Este intento presentó mejores resultados, ya que se tenía una última capa de suelo mejor lograda y se completaba la probeta.

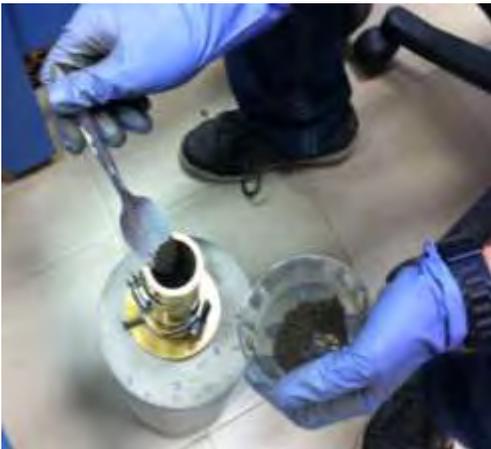


FIGURA 2.10 Llenado de molde para formar probetas



FIGURA 2.11 Uso del pisón para formar probetas

2.3.7 Prueba de compactación

Se siguen el mismo proceso del punto 2.5 A) hasta el punto 14 y se continúa con lo siguiente.

- 1) Una vez que se tomó el peso de la probeta, ésta se mete al horno a 105°C por 24 horas.
- 2) Se saca la probeta del horno y se mete al desecador aproximadamente por 2 horas con el fin de evitar errores en la medición del peso por el fenómeno de cavitación.

- 3) Se toma el peso seco de la probeta para obtener el contenido de humedad real y la densidad seca del suelo.
- 4) En una gráfica donde el contenido de humedad (w) se encuentre en el eje de las abscisas y la densidad seca del suelo (G_d) como ordenada, se traza una curva uniendo los puntos obtenidos hasta obtener un punto máximo en la curva. En ese punto máximo se tendrá la humedad óptima y la densidad seca óptima del suelo.

Para la prueba de compactación con el suelo fino manejado en este estudio, se realizaron 6 probetas con diferentes contenidos de humedad dentro de un rango del 35% al 45% para obtener el contenido de humedad óptimo.

2.3.8 Montaje en cámara triaxial

Para el montaje en la cámara triaxial se calibraron todos los instrumentos de medición.

- A) El sensor de desplazamiento
- B) El sensor de confinamiento
- C) El sensor de carga

Cada vez que se realiza un montaje de probetas en la cámara triaxial, se verifica que este en condiciones óptimas, esto es:

- Revisar que las superficies internas de la cámara estén limpias para evitar malas lecturas y contaminación de polvo en el equipo.
- Comprobar que los transductores estén en debido funcionamiento, así como todos los dispositivos debidamente conectados.
- Usar pasta de silicón para sellar cualquier fisura u orificio por donde se pueda escapar presión de la cámara.
- Contar con el material necesario para realizar la prueba (Probeta, membrana, O-rings, pasta de silicón, aceite de silicón, molde partido, abrazadera, franela, sistema de vacío para membrana y molde partido)
- Ayuda para poder montar adecuadamente

Teniendo todo eso se puede realizar el montaje con más facilidad con los siguientes pasos:

1. Una vez elaborada la probeta se le toman medidas de diámetro y altura, se pesa y se anota el peso.
2. Realizado lo anterior se cubre la probeta con un trapo húmedo para evitar que pierda humedad y se coloca sobre una charola.
3. Se arma el molde partido utilizando un anillo para sujetar ambos lados.
4. Se usarán cuatro anillos denominados "O-rings", se les unta aceite de silicón de forma discreta para disminuir su fricción y tener un mejor manejo de ellos; se colocan en la parte externa del molde partido (se usan 2 en cada extremo).

5. Se coloca la membrana por la parte interna del molde partido, haciendo doblez en cada extremo para que se mantenga fija
6. Se enciende el sistema de vacío y se conecta al molde para sellar la membrana en la parte interna del mismo. Es necesario colocar una superficie suave debajo del molde por donde estará la membrana para evitar que se rompa una vez colocada.
7. Se coloca la probeta en el pedestal de la cámara.
8. Con el sistema de vacío funcionando, se coloca el molde sobre la probeta. Esto debe hacerse con mucho cuidado ya que un contacto brusco con la membrana puede dañarla.
9. Se coloca el cabezal superior de la cámara sobre la probeta.
10. Se centra el molde partido con la probeta y se le retira el vacío al molde para que la membrana actúe como envolvente de la probeta y así evitar cualquier ganancia o pérdida de humedad.
11. Los O-rings que se encuentran en el molde partido se removerán a cada extremo de la membrana para reforzar la impermeabilidad de la membrana.
12. Se desarma el molde partido y se retira, evitando cualquier contacto con la probeta.
13. Se unta pasta de silicón en los extremos de la “camisa” de la cámara para asegurar que selle lo mejor posible al colocarla. Existen O-rings de mayor tamaño en la base y superficie de la cámara y estos deben estar en su posición al colocar la camisa, de lo contrario se pueden cortar por el peso del pistón de la cámara. Hecho lo anterior se coloca la “camisa” en la cámara, se coloca el pistón y se asegura la cámara.
14. Se conecta el tubo de confinamiento a la cámara sin abrir la válvula que permite el paso del confinamiento.
15. Se acomoda el pistón de desplazamiento sobre el cabezal para que exista un contacto desde la primera carga que se aplique en la probeta
16. Se aplica el confinamiento de acuerdo a la probeta que se ensaye. Se debe aplicar un poco de peso sobre la probeta para rectificar que haya contacto y se establece la velocidad de deformación de 20mm/hr.
17. En el programa de computadora especializado para las pruebas triaxiales conectado a la misma cámara se registran los datos de la probeta, se agregan los valores de desplazamiento y tiempo, se mide el confinamiento que se le dará a la probeta (se abre la válvula de confinamiento en la cámara y se incrementa lentamente hasta llegar al confinamiento deseado), se agrega un poco de carga y por último se inicia la prueba.

2.3.9 Prueba de compresión triaxial estática

Una vez que se haya realizado el montaje de la probeta en la cámara triaxial, con el fin de trazar la envolvente de falla del suelo y obtener los valores de la cohesión y ángulo de fricción interna del mismo, se llevará a la falla cada probeta utilizando los diferentes confinamientos.

Gracias a los transductores instalados en la cámara triaxial los datos que se obtienen por cada intervalo de tiempo en el ensaye son graficados, siendo:

- Carga aplicada a la probeta como ordenada (P)
- Deformación longitudinal de la probeta como abscisa (δ)
- Presión de confinamiento como constante (σ_3).

Para obtener los esfuerzos principales mayor (σ_1) y menor (σ_3) que se ejerce en cada probeta, junto con su esfuerzo tangencial (τ) y así graficar los círculos de Mohr – Coulomb, se tiene que:

$$\sigma_1 = \frac{AC}{P} \quad A_C = \frac{A_i}{1-\varepsilon} \quad \varepsilon = \frac{\delta}{h_i}$$

Ecuación 2.2

Donde:

σ_1 : esfuerzo principal mayor [kg/cm²].

AC: área transversal corregida de la probeta [cm²].

P: carga aplicada en la probeta [kg].

A_i: área inicial transversal de la probeta [cm²].

ε : relación de deformación [1].

δ : deformación de la probeta [cm].

h_i : altura inicial de la probeta [cm].

Además, se sabe que:

$$\tau = \frac{\sigma_1}{2}$$

Ecuación 2.3

Con los esfuerzos principales como abscisa y el esfuerzo tangencial como ordenada, se grafican los círculos de Mohr para diferentes esfuerzos de confinamiento.

3 RESULTADO DE LAS PRUEBAS

Los resultados de las pruebas que se muestran en este capítulo fueron obtenidos en el laboratorio de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Igualmente, todo el equipo y material necesario para su realización fue proporcionado por esta institución.

3.1 Clasificación del suelo

Previamente se había determinado que el material utilizado corresponde a un suelo fino, además, a éste se le realizó un proceso de tamizado por la malla #60 con objetivo de asegurarse que todas las partículas de suelo sean menores o iguales a 250 μm .

Para clasificar el suelo, se realizaron las pruebas de los límites de Atterberg, obteniendo el índice de plasticidad, necesario para su clasificación de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

Se realizaron dos mediciones para conseguir el límite plástico (PL) del suelo. Con el promedio se obtuvo el contenido de humedad (w) para el límite plástico.

Límite plástico							
No. Ensaye	No. Tara	Peso tara+suelo seco (gr)	Peso de tara+suelo seco (gr)	Peso del agua (gr)	Peso de tara (gr)	Peso del suelo seco (gr)	Contenido de agua (%)
1	34	47.481	46.646	0.835	45.712	0.934	89.4
2	31	48.359	47.462	0.897	46.438	1.024	87.5

Tabla 3.1 Resultados de la prueba de límite plástico

El promedio de las 2 mediciones es de 88.45%.

Para el límite líquido se realizaron 4 ensayos.

Límite líquido										
No. Ensaye	No. Tara	No. Golpes			Peso de tara + suelo húmedo (grs)	Peso tara + suelo seco (grs)	Peso del agua (grs)	Peso tara (grs)	Peso suelo seco (grs)	Contenido de agua (%)
1	56	36	36	37	65.628	59.987	5.641	57.896	2.091	269.78
2	55	26	26	26	66.723	62.811	3.912	61.415	1.396	280.23
3	122	17	16	17	75.682	68.863	6.819	66.594	2.269	300.53
4	57	8	7	8	67.034	62.138	4.896	60.62	1.518	322.53

Tabla 3.2 Resultados de la prueba de límite líquido

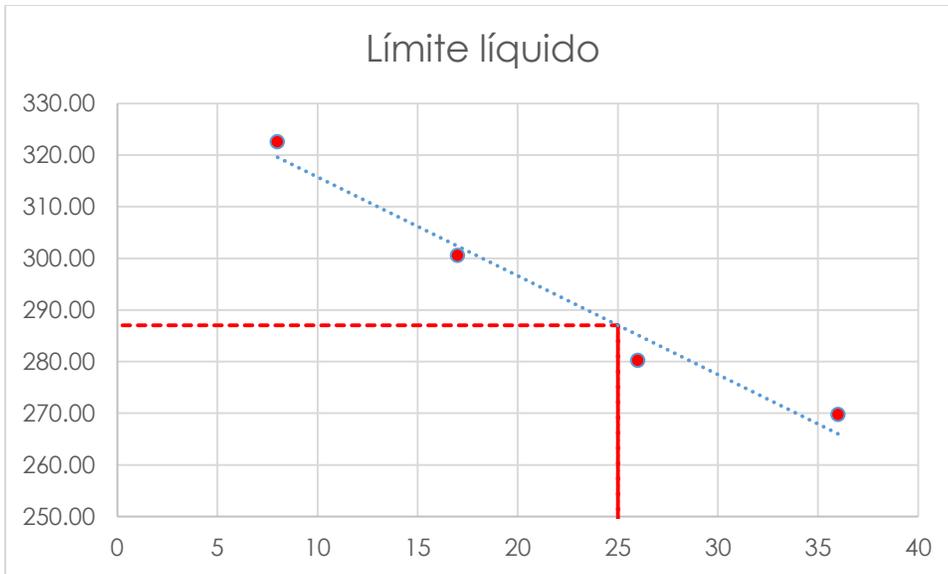


FIGURA 3.1 Gráfico límite líquido

La ecuación de la recta en la gráfica para determinar el porcentaje de humeado óptimo es:
 $Y = -1.9111(X) + 334.83$ (ésta es tomada del software donde se graficó).

m=	-1.9111
b ₀ =	334.83

x	y
25	287.0525

Se sabe que el contenido de humedad del límite líquido (LL) es aquel donde el número de golpes (N) es igual a 25. Para determinar el contenido de humedad (w) en ese punto, con los puntos graficados se realiza el ajuste de una función por mínimos cuadrados, obteniéndose la ecuación:

$$W = -0.066 \ln(N) + 1.109$$

Ecuación 3.1 Contenido de humedad

Se utiliza esta ecuación para sustituir a N con un valor de 24 y se determina el contenido de humedad para el límite líquido, el cual es: LL=283.18%.

Posteriormente se determina el índice de plasticidad (PI) del suelo mediante la diferencia de los contenidos de humedad del límite líquido con el límite plástico.

$$283.18\% - 88.45\% = 194.73\%$$

Sabiendo que el suelo cuenta con un $LL=283.18\%$ y un $PI=194.73\%$ se ingresa con dichos valores a la gráfica de plasticidad. Prolongando las rectas el suelo se encuentra por debajo de la línea A que separa a las arcillas de los limos. Siendo el suelo un limo de alta plasticidad (MH).

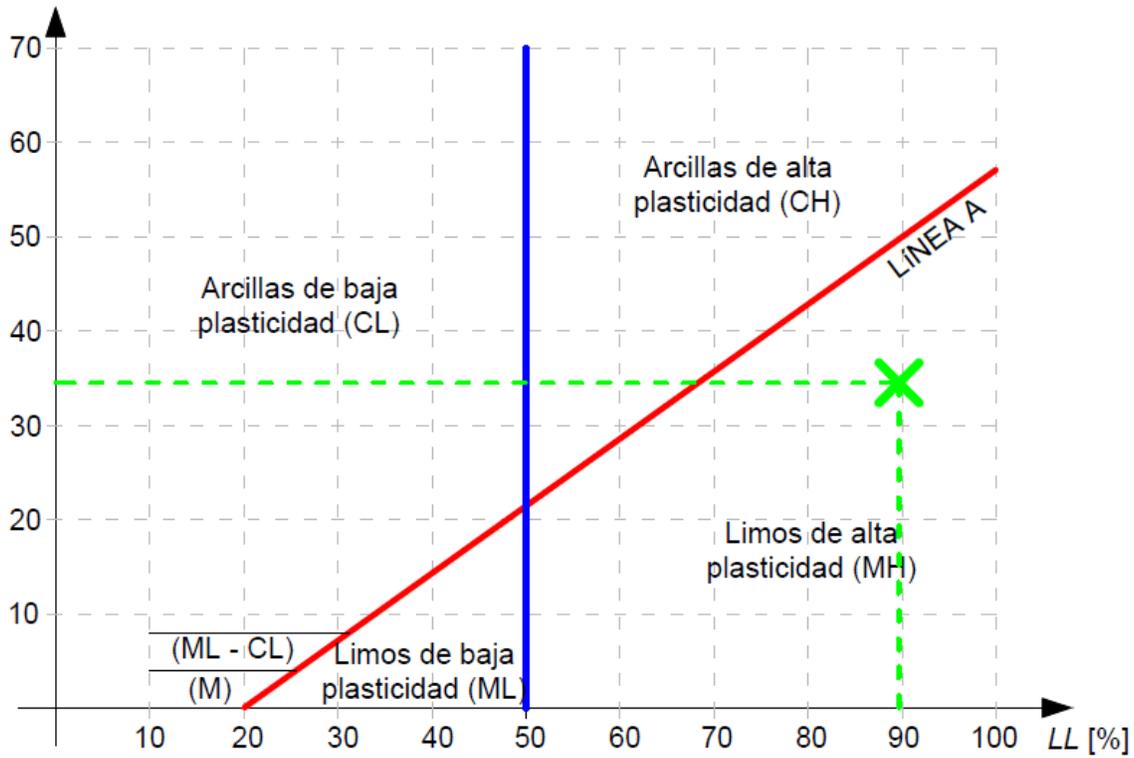


FIGURA 3.2 Gráfica de clasificación SUCS

3.2 Densidad de sólidos

Se realizaron dos mediciones para obtener la densidad de sólidos (Gs) del suelo, siendo la media aritmética la que se tomó como la densidad del suelo estudiado.

Los datos para obtener la densidad de sólidos se muestran en la siguiente tabla.

Densidad de sólidos										
Ensaye	No. Matraz	Peso matraz +agua +suelo (gr)	T (°C)	No. Tara	Peso matraz+agua (gr)	Peso de cápsula (gr)	Peso suelo + cápsula (gr)	Ws (gr)	Vw (cm3)	Densidad de sólidos (Gs)
1	1	676.10	19.6	12	662.6	164.3	186.5	22.2	8.7	2.55
2	4	697.10	19.1	8	682.6	165.6	189.2	23.6	9.1	2.59

Tabla 3.3 Resultados de la densidad de sólidos

La media aritmética de las mediciones nos da un resultado final para la densidad de sólidos de: $G_s=2.57\text{g/cm}^3$.

3.3 Peso específico

Para el peso específico se determinaron los datos que se presentan en la siguiente tabla:

Peso específico			
Peso muestra (gr)	Peso + cera (gr)	Peso en agua (gr)	Peso de la cera (gr)
140.8	148.5	148.4	7.6
Volumen (m3)	Volumen (cm3)	Peso efectivo (gr)	Peso específico (kg/m3)
0.000120	120	140.80	852.27

Tabla 3.4 Resultados del peso específico

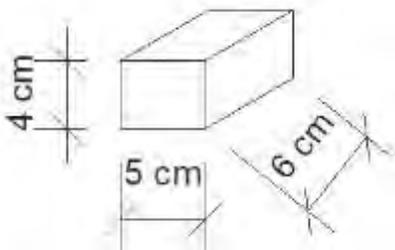


FIGURA 3.3 Dimensiones del cubo para determinar el peso específico del suelo.

El peso del suelo es de 852.27 kg/m^3 aproximadamente.

3.4 Curva de compactación

Se conformaron 6 probetas para determinar la curva de humedad óptima, cada probeta se elaboró con 120 gramos de suelo y un porcentaje de humedad distinto. Los porcentajes de humedad se encuentran entre el 35% y 45%. Finalmente, para comprobar que el 41% de humedad era la cantidad óptima de agua se repitió una probeta con 40% de agua.

Determinación de humedad óptima										
Porcentaje de agua teórico (%)	Peso de suelo (gr)	Peso de agua teórico (gr)	Peso del molde (gr)	Peso del molde + probeta h (gr)	Peso de la probeta h (gr)	No. Tara	Peso de tara (gr)	Tara + muestra h (gr)	Tara + muestra seca (gr)	% Real de agua
35%	120	38.5	1033.1	1163.5	130.4	80	124.2	177.3	163.7	34.43%
37%	120	44.4	1033.1	1169	135.9	95	126.2	172.5	159.8	37.80%
40%	120	48	1033.1	1175.9	142.8	99	123.5	168.5	155.4	41.07%
43%	120	51.6	1033.1	1173.9	140.8	80	124.2	163.9	152.1	42.29%
45%	120	54	1033.1	1171.7	138.6	142	115	158.6	144.7	46.80%
40%	120	48	1033.1	1174	140.9	109	121	156.3	146.1	40.64%

Tabla 3.5 Determinación de la humedad óptima

Peso volumétrico seco			
Contenido de agua %	W material en molde (gr)	Volumen del molde (m ³)	γ_d (gr/cm ³)
34.43%	130.4	9.16E+01	1.42
37.80%	135.9	9.16E+01	1.48
40.64%	140.9	9.16E+01	1.53
41.07%	142.8	9.16E+01	1.55
42.29%	140.8	9.16E+01	1.53
46.80%	138.6	9.16E+01	1.51

Tabla 3.6 Resultados del peso volumétrico seco

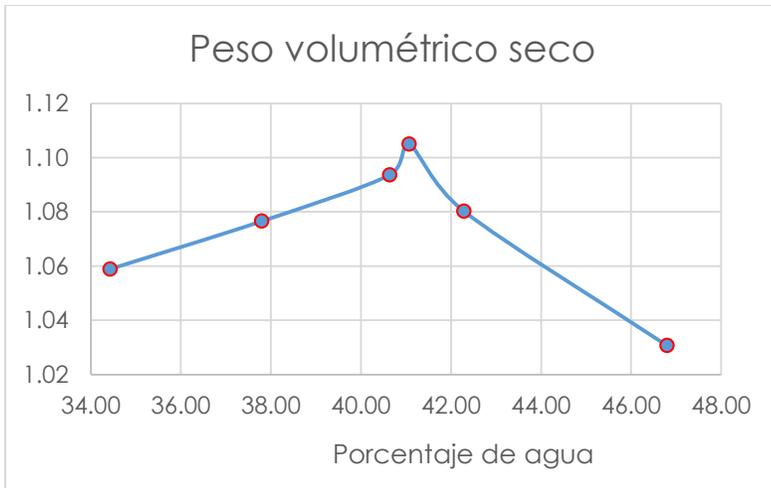


FIGURA 3.4 Gráfica del peso volumétrico seco

Peso volumétrico seco			
Contenido de agua %	W material en molde (gr)	Volumen del molde (m^3)	γ_d (gr/cm^3)
34.43%	130.4	9.16E+01	1.42
37.80%	135.9	9.16E+01	1.48
40.64%	142.8	9.16E+01	1.56
41.07%	140.8	9.16E+01	1.54
42.29%	138.6	9.16E+01	1.51
46.80%	140.9	9.16E+01	1.54

Tabla 3.7 Resultados del peso volumétrico húmedo

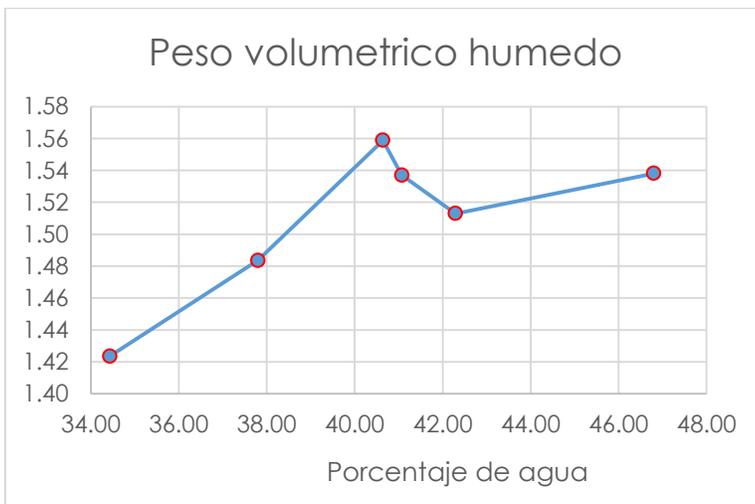


FIGURA 3.5 Gráfica del peso volumétrico húmedo

3.5 Criterio de Mohr – Coulomb.

Se hicieron los cálculos para determinar los círculos de Mohr con los datos obtenidos de las pruebas triaxiales estáticas.

3.5.1 Círculos de Mohr para suelo natural sin reforzamiento de fibras de PET.

Análisis en términos de esfuerzos totales					
Prueba	$q_{m\acute{a}x}$	σ_3	σ_1	Centro	Radio
No.	kg/cm ²				
1	2.9054	0.50	3.4054	1.9527	1.4527
2	4.1586	1.00	5.1586	3.0793	2.0793
3	4.2488	1.50	5.7488	3.6244	2.1244

Tabla 3.8 Resultados para el trazo de los círculos de Mohr sin reforzamiento de fibras de PET.

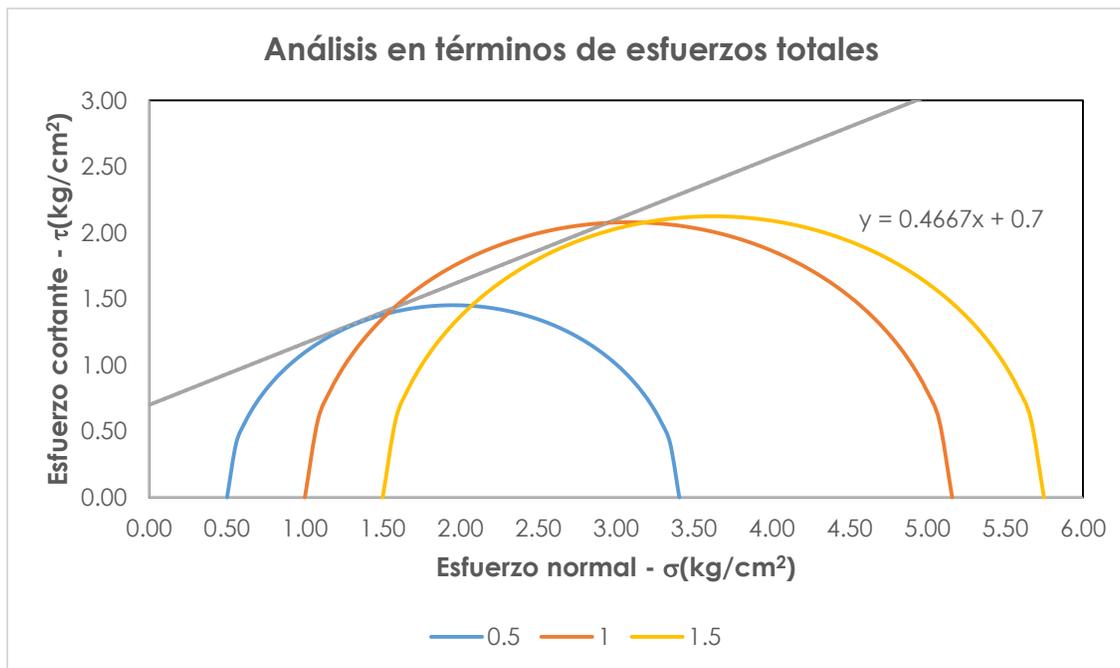


FIGURA 3.6 Resultados de los círculos de Mohr de las probetas sin reforzamiento de fibras de PET.

Parámetros de resistencia		
c	0.7	kg/cm ²
ϕ	25.02	grados

Tabla 3.9

El tercer círculo muestra una semejanza al segundo. Existía la limitación técnica en cuanto a la carga que podía aplicar el pistón de la cámara triaxial, debido a ésta razón las probetas ensayadas con confinamiento de 1.5 kg/cm² presentan similitudes a las probetas que se ensayaron con 1.0 kg/cm² de confinamiento.

3.5.2 Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 0.3% de fibras de PET.

Análisis en términos de esfuerzos totales					
Prueba	$q_{m\acute{a}x}$	σ_3	σ_1	Centro	Radio
No.	kg/cm ²				
1	2.9968	0.50	3.4968	1.9984	1.4984
2	6.4084	1.00	7.4084	4.2042	3.2042
3	6.7580	1.50	8.2580	4.8790	3.3790

Tabla 3.10 Resultados para el trazo de los círculos de Mohr con 0.3% de fibras de PET.

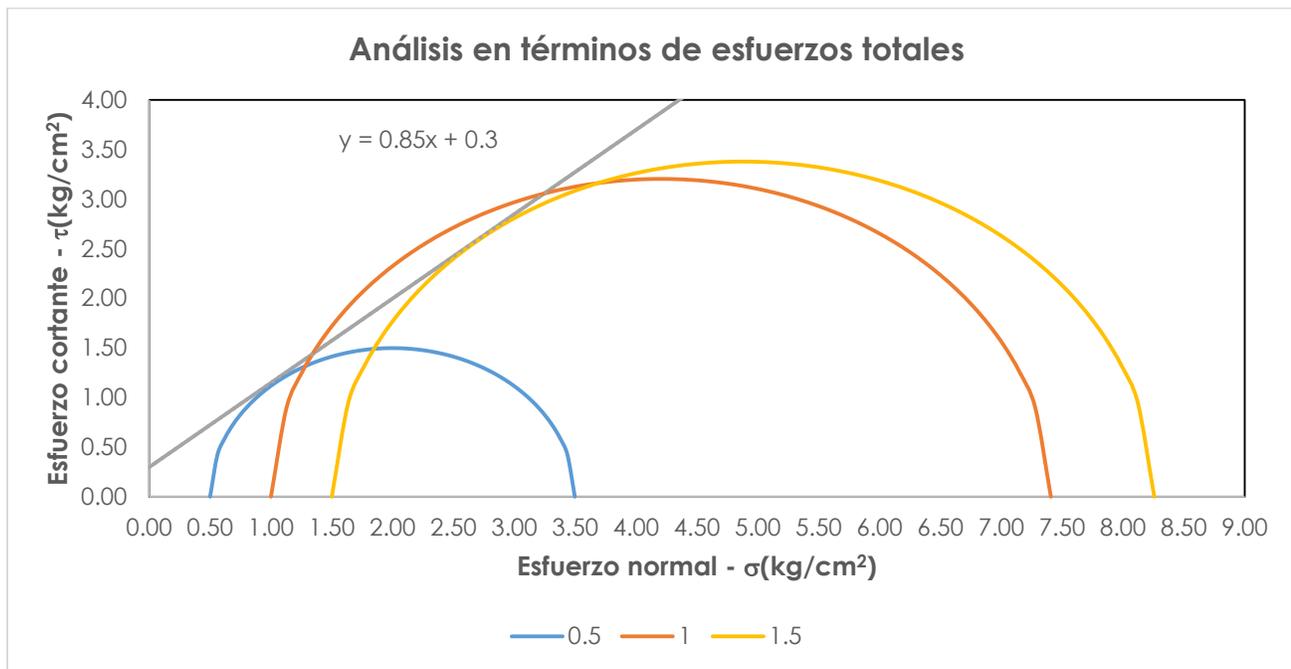


FIGURA 3.7 Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 0.3% de fibras de PET.

Parámetros de resistencia - TET		
c	0.3	kg/cm ²
ϕ	40.36	grados

Tabla 3.11

La cohesión disminuye debido al uso de fibras de PET, a su vez incrementa el ángulo de fricción interno del suelo.

3.5.3 Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 0.6% de fibras de PET.

Análisis en términos de esfuerzos totales					
Prueba	$q_{m\acute{a}x}$	σ_3	σ_1	Centro	Radio
No.	kg/cm ²				
1	2.3160	0.50	2.8160	1.6580	1.1580
2	5.7547	1.00	6.7547	3.8773	2.8773
3	6.8128	1.50	8.3128	4.9064	3.4064

Tabla 3.12 Resultados para el trazo de los círculos de Mohr con 0.6% de fibras de PET.

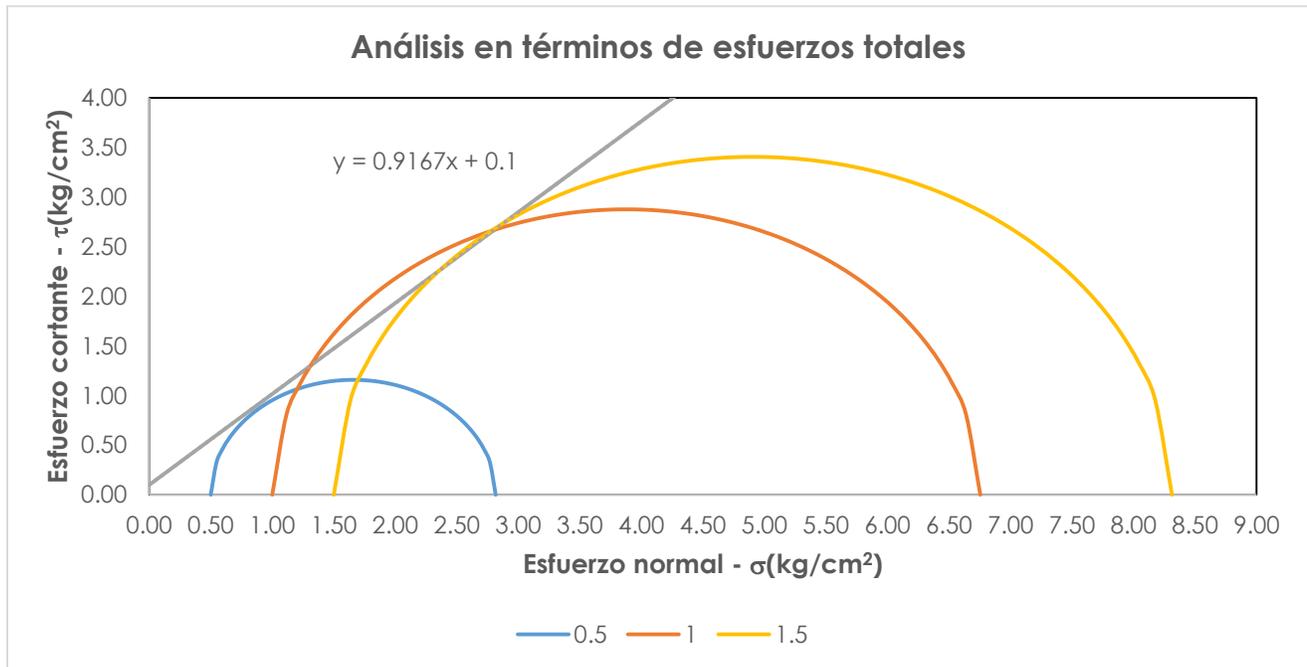


FIGURA 3.8 Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 0.6% de fibras de PET.

Parámetros de resistencia		
c	0.1	kg/cm ²
ϕ	42.51	grados

Tabla 3.13

La cohesión disminuye en estas pruebas debido a que se usan más fibras de PET, a su vez incrementa el ángulo de fricción interno del suelo.

3.6 Comportamiento esfuerzo – deformación.

Se presenta a continuación las gráficas obtenidas de las probetas de suelo natural sin PET con confinamiento de 0.5 kg/cm^2 , 1.0 kg/cm^2 , y 1.5 kg/cm^2 respectivamente. En todas las gráficas las dos líneas representan la curva de esfuerzo deformación de las probetas ensayadas.

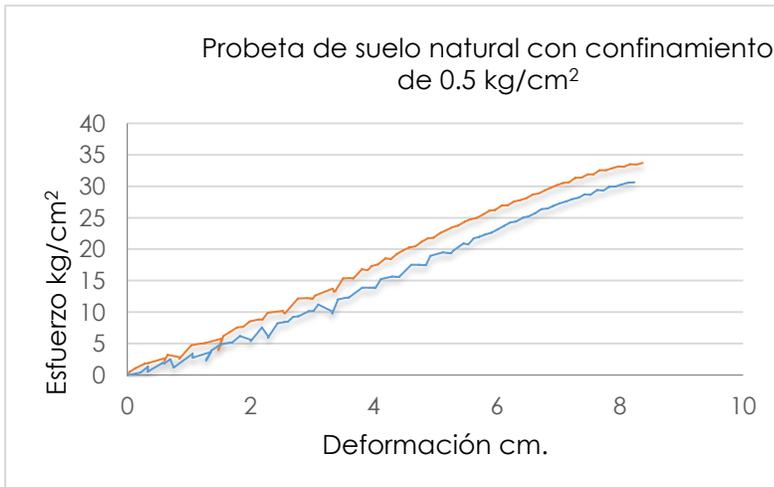


FIGURA 3.10 Probeta de suelo natural con confinamiento de 0.5 kg/cm^2 .

En la figura se puede ver que con el confinamiento dado se obtiene una resistencia menor a 40 kg/cm^2 , posteriormente con las adiciones de fibra de PET se verá un incremento en la resistencia del suelo.

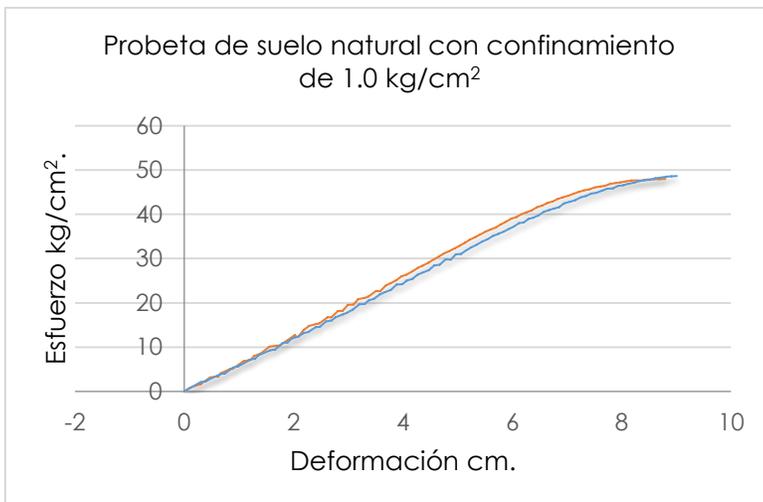


FIGURA 3.11 Probeta de suelo natural con confinamiento de 1.0 kg/cm^2 .

Como era de esperarse la resistencia se incrementó con el confinamiento.

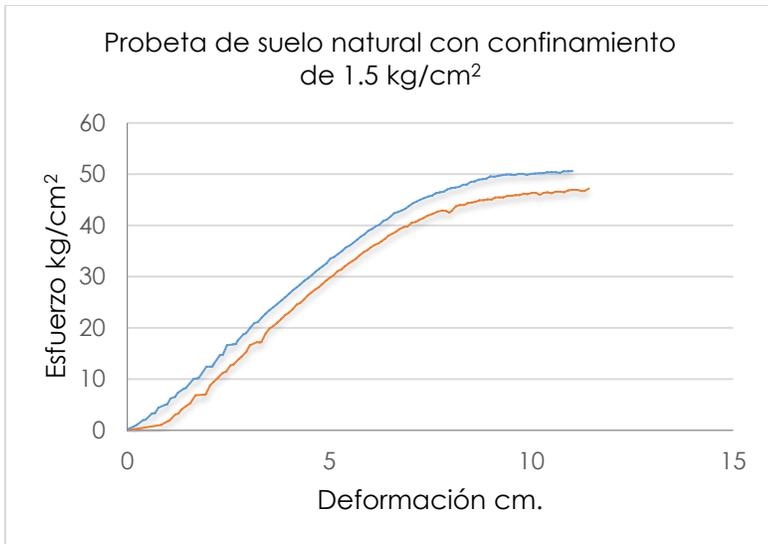


FIGURA 3.12 Probeta de suelo natural con confinamiento de 1.5 kg/cm².

Se observa en la figura que el módulo de elasticidad sufre un incremento importante debido al aumento del confinamiento, siendo este un efecto en muchos casos benéfico.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de las probetas de suelo reforzadas con 0.3% de PET y confinamientos de 0.5 kg/cm², 1.0 kg/cm² y 1.5 kg/cm² respectivamente.

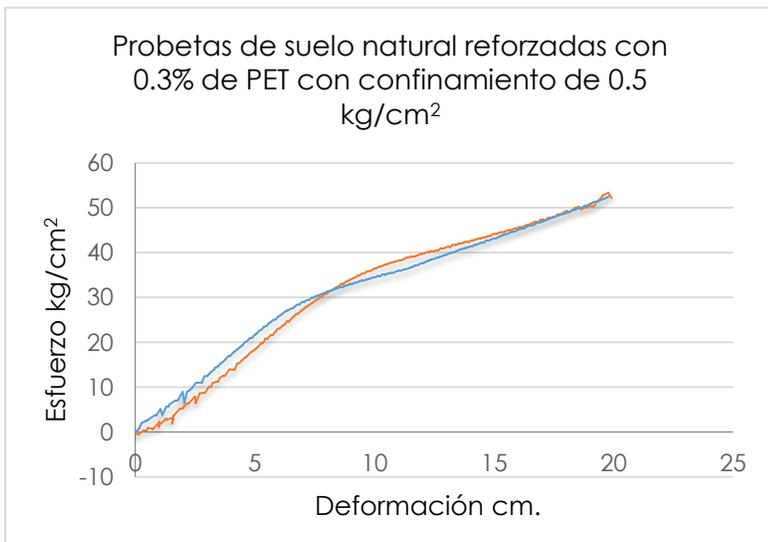


FIGURA 3.13 Probeta de suelo natural reforzada con 0.3% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm².

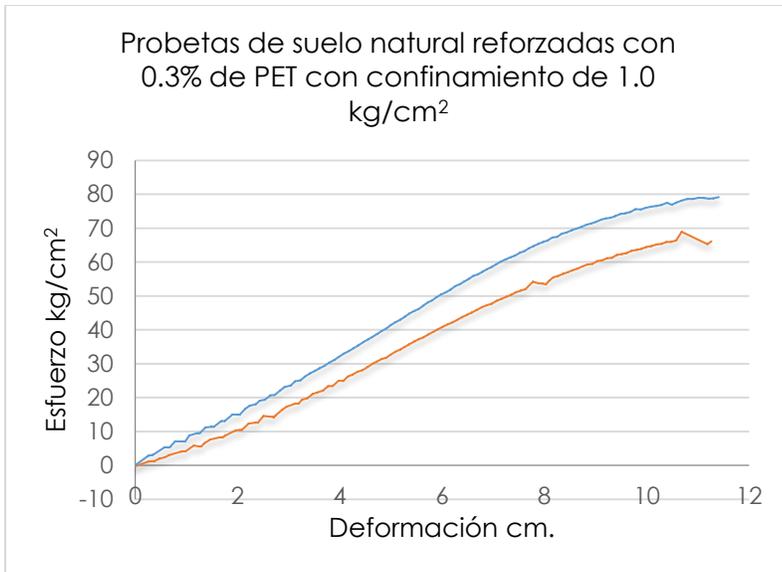


FIGURA 3.14 Probeta de suelo natural reforzada con 0.3% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm².

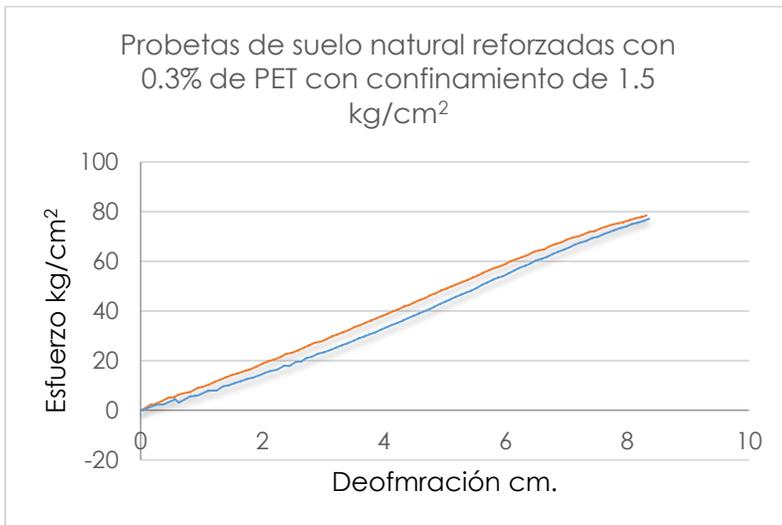


FIGURA 3.15 Probeta de suelo natural reforzada con 0.3% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm².

Se observa que para el caso de 0.3% de fibra de PET agregada, la resistencia del suelo se incrementa de forma notoria respecto del caso sin adiciones de la misma fibra y se incrementa la capacidad de deformación sin que se presente plastificación del material.

Resultados obtenidos de los ensayos del suelo reforzado con 0.6% de PET y confinamientos de 0.5 kg/cm², 1.0 kg/cm² y 1.5 kg/cm² respectivamente.

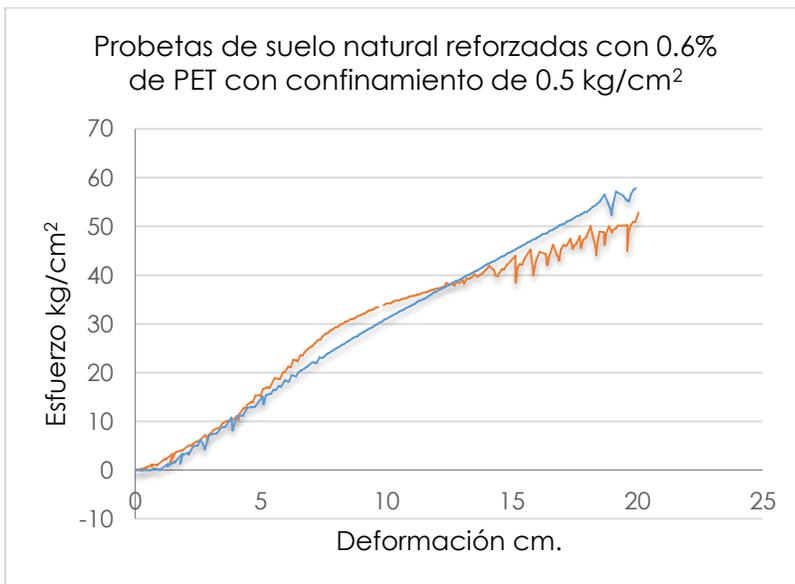


FIGURA 3.16 Probeta de suelo natural reforzada con 0.6% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm².

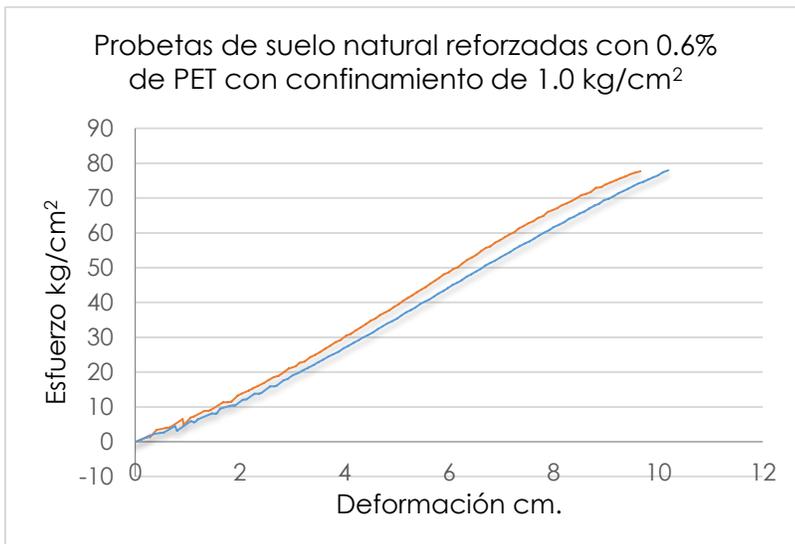


FIGURA 3.17 Probeta de suelo natural reforzada con 0.6% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm².

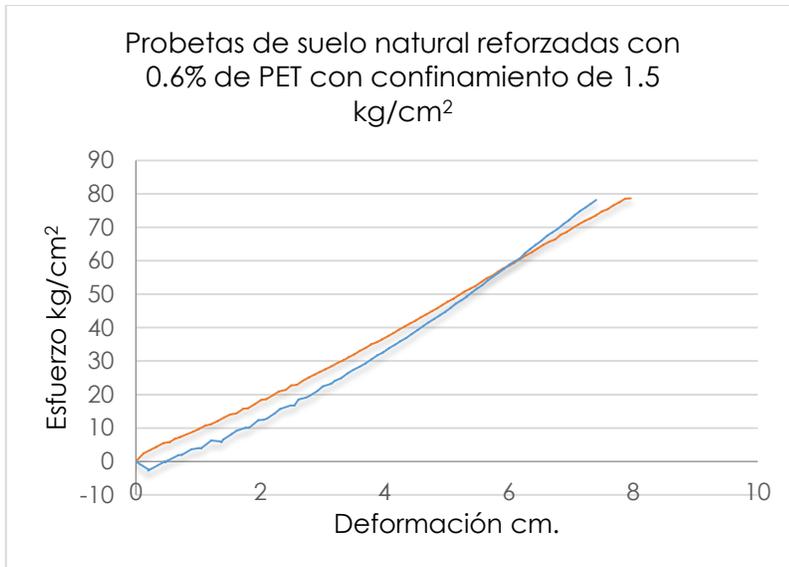


FIGURA 3.18 Probeta de suelo natural reforzada con 0.6% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm².

Se observa respecto de los casos anteriores una tendencia a incrementar el módulo de elasticidad a medida que se incrementa el porcentaje agregado de fibra de PET.

Resultados obtenidos de los ensayos del suelo reforzado con 1% de PET y confinamientos de 0.5 kg/cm², 1.0 kg/cm² y 1.5 kg/cm² respectivamente.

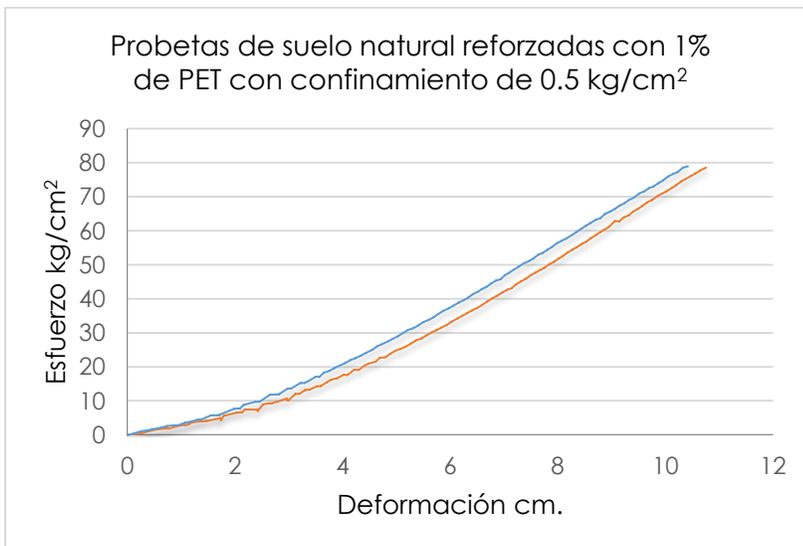


FIGURA 3.19 Probeta de suelo natural reforzada con 1% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm².

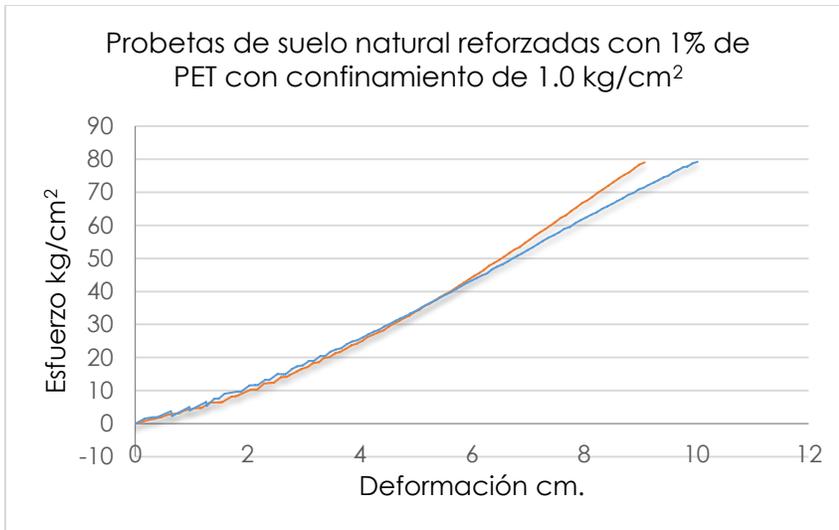


FIGURA 3.20 Probeta de suelo natural reforzada con 1% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm².

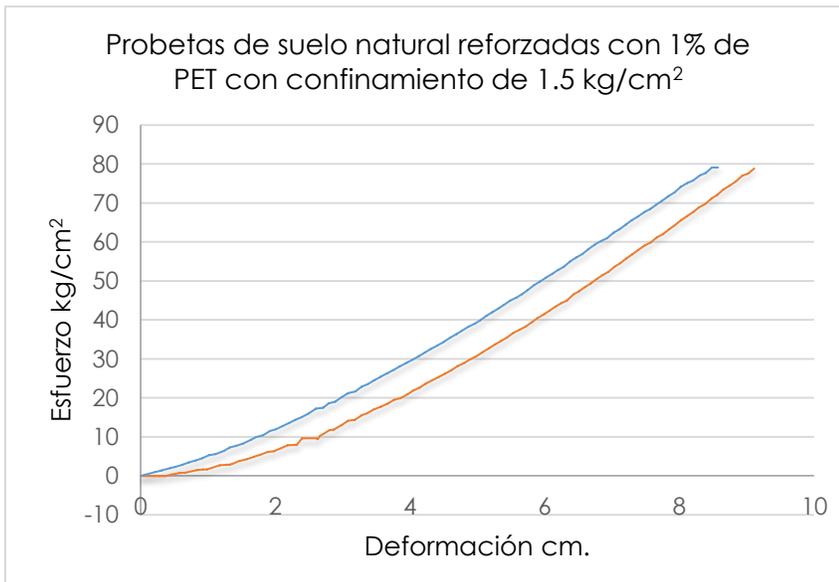


FIGURA 3.21 Probeta de suelo natural reforzada con 1% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm².

Finalmente el incremento al 1% de la fibra de PET no muestra un incremento significativo del módulo de elasticidad ni de la resistencia respecto del 0.6% de fibra, por lo cual se podría estar en una condición en la cual el incremento de fibra comienza a no ser tan benéfico.

3.7 Módulos de elasticidad.

Como se menciona al principio de la tesis, hubo una limitante técnica por parte del equipo donde se realizaron las pruebas. Este registraba una carga máxima de 80 kg/cm². Por tanto se tomó el módulo de elasticidad al 10% de la deformación de las probetas.

La ecuación para calcular el módulo de elasticidad fue la siguiente:

$$E: \frac{F * L1}{A * L2}$$

Ecuación 3.2 Módulo de elasticidad.

Donde:

F: Fuerza aplicada a la probeta.

A: Área de la sección de la probeta.

L1: Longitud original de la probeta.

L2: Deformación en la probeta.

A continuación se muestran los módulos de elasticidad de las probetas ensayadas. Estos se calcularon a partir de los datos registrados del software que se utilizó en los ensayos.

10% DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN PROBETAS					
PROBETAS SIN REFORZAMIENTO DE PET					
CONFINAMIENTO KG/CM2	FUERZA APLICADA KG	ÁREA CM2	L2 CM	L1 CM	MÓDULO DE ELASTICIDAD E KG/CM2
0.5	2.01	10.46	0.082	8.50	19.82
1	4.51	10.46	0.090	8.50	40.68
1.5	6.55	10.46	0.110	8.50	48.31

Tabla 3.14 Módulo de elasticidad para probetas sin reforzamiento de fibras de PET.

10% DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN PROBETAS					
PROBETAS CON 0.3% DE REFORZAMIENTO DE FIBRAS DE PET					
CONFINAMIENTO KG/CM2	FUERZA APLICADA KG	ÁREA CM2	L2 CM	L1 CM	MÓDULO DE ELASTICIDAD KG/CM2
0.5	5.24	10.46	0.199	8.50	21.38
1	5.85	10.46	0.113	8.50	42.21
1.5	7.53	10.46	0.084	8.50	73.19

Tabla 3.15 Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 0.3% de fibras de PET.

10% DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN PROBETAS					
PROBETAS CON 0.6% DE REFORZAMIENTO DE FIBRAS DE PET					
CONFINAMIENTO KG/CM2	FUERZA APLICADA KG	ÁREA CM2	L2 CM	L1 CM	MÓDULO DE ELASTICIDAD KG/CM2
0.5	5.46	10.46	0.200	8.50	22.14
1	5.71	10.46	0.097	8.50	48.03
1.5	7.89	10.46	0.0796	8.50	80.55

Tabla 3.16 Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 0.6% de fibras de PET.

10% DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN PROBETAS					
PROBETAS CON 1.0% DE REFORZAMIENTO DE FIBRAS DE PET					
CONFINAMIENTO KG/CM2	FUERZA APLICADA KG	ÁREA CM2	L2 CM	L1 CM	MÓDULO DE ELASTICIDAD KG/CM2
0.5	21.13	10.46	0.620	8.50	27.69
1	31.15	10.46	0.447	8.50	56.63
1.5	41.16	10.46	0.3500	8.50	95.56

Tabla 3.17 Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 1.0% de fibras de PET.

3.8 Resistencia.

3.8.1 Porcentajes de deformación.

Los porcentajes de deformación que se muestran son con respecto al tamaño original de la probeta (85mm) después de haber sido sometidas al ensaye triaxial.

DEFORMACIÓN DE SUELO NATURAL			DEFORMACIÓN CON 0.6% DE FIBRAS DE PET		
Confinamiento	Deformación	Promedio	Confinamiento	Deformación	Promedio
0.5 kg/cm ²	9.85%	9.77%	0.5 kg/cm ²	23.57%	23.51%
0.5 kg/cm ²	9.69%		0.5 kg/cm ²	23.45%	
1.0 kg/cm ²	10.59%	10.47%	1.0 kg/cm ²	8.80%	8.57%
1.0 kg/cm ²	10.35%		1.0 kg/cm ²	8.34%	
1.5 kg/cm ²	13.44%	13.21%	1.5 kg/cm ²	10.68%	11.08%
1.5 kg/cm ²	12.97%		1.5 kg/cm ²	11.48%	
DEFORMACIÓN CON 0.3% DE FIBRAS DE PET			DEFORMACIÓN CON 1.0% DE FIBRAS DE PET		
Confinamiento	Deformación	Promedio	Confinamiento	Deformación	Promedio
0.5 kg/cm ²	23.43%	23.36%	0.5 kg/cm ²	12.65%	12.45%
0.5 kg/cm ²	23.29%		0.5 kg/cm ²	12.25%	
1.0 kg/cm ²	11.36%	11.68%	1.0 kg/cm ²	10.68%	11.23%
1.0 kg/cm ²	11.99%		1.0 kg/cm ²	11.78%	
1.5 kg/cm ²	9.36%	9.04%	1.5 kg/cm ²	10.72%	10.40%
1.5 kg/cm ²	8.71%		1.5 kg/cm ²	10.08%	

Tabla 3.18 Porcentajes de deformación usando 0%, 0.3%, 0.6% y 1% de PET

En las probetas labradas de suelo natural se observa que cuanto mayor es el confinamiento, mayor es el porcentaje de deformación; es decir, requieren de más esfuerzo antes de fallar. Esto se debe a que el confinamiento en la cámara triaxial les da más rigidez a las probetas ensayadas, de esta forma tienen mayor resistencia.

Por otro lado, las probetas con adiciones de fibras de PET, se observa que cuanto mayor confinamiento, menor es el porcentaje de deformación. Pero es necesario considerar que la capacidad de deformación del suelo reforzado con fibra de PET se incrementa de forma importante respecto del suelo natural. Lo cual le brinda una mayor capacidad de deformación al suelo sin sufrir agrietamiento.

Las probetas que se ensayaron con 0.6% de fibras de PET presentaron el mejor resultado y se obtuvo con un confinamiento de 1.0 kg/cm²; así mismo, se obtuvo el resultado más bajo con el mismo porcentaje de fibras de PET, pero con un confinamiento de 0.5kg/cm². Es importante tener este tipo de comparativos; pues son importantes para poder determinar el porcentaje óptimo de fibras de PET a utilizar en el diseño de estructuras terreas.

A continuación se muestra un comparativo de deformación en las probetas que no tienen reforzamiento de fibras PET con las que usaron reforzamiento de fibras de PET. Se calcula cuanto varió la deformación de las probetas.

Se hicieron dos clasificaciones, críticas y óptimas. Las críticas son las probetas que tuvieron menor resistencia y las óptimas las que tuvieron mayor resistencia.

CRÍTICAS			
COMPARATIVO DE MEJORAS OBTENIDAS EN PROBETAS SIN PET VS PROBETAS CON PET			
PORCENTAJES DE PET	CONF. 5	CONF. 1.0	CONF. 1.5
0.0%	9.85%	10.59%	13.21%
0.3%	11.12%	8.31%	6.60%
MEJORA	-11.42%	27.44%	100.15%
0.0%	9.85%	10.59%	13.21%
0.60%	12.85%	7.66%	6.36%
MEJORA	-23.35%	38.25%	107.70%
0.0%	9.85%	10.59%	13.21%
1.00%	7.09%	7.69%	7.97%
MEJORA	38.93%	37.71%	65.75%

Tabla 3.19 Comparativo de deformación en las probetas ensayadas menos favorables.

En el caso de las probetas que contenían 0.3% y 0.6% de fibras de PET con confinamiento de $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$, se observa que existe mayor deformación en las probetas con respecto a las probetas conformadas por suelo natural. Esto se debe a que las fibras de PET funcionan como material de refuerzo a medida que se elongan las fibras durante el proceso de deformación de la probeta, permitiendo que las probetas puedan resistir mayores esfuerzos sin fallar.

Así mismo, ambos porcentajes de fibras de PET obtuvieron los mejores resultados con un confinamiento de $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$, esto es debido que el confinamiento incrementa el módulo de elasticidad permitiéndoles tener mayor resistencia y menor deformación.

En este caso el porcentaje ideal de fibras de PET para confinamientos mayores a $1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ es de 0.6% y para confinamientos menores a este es de 1%.

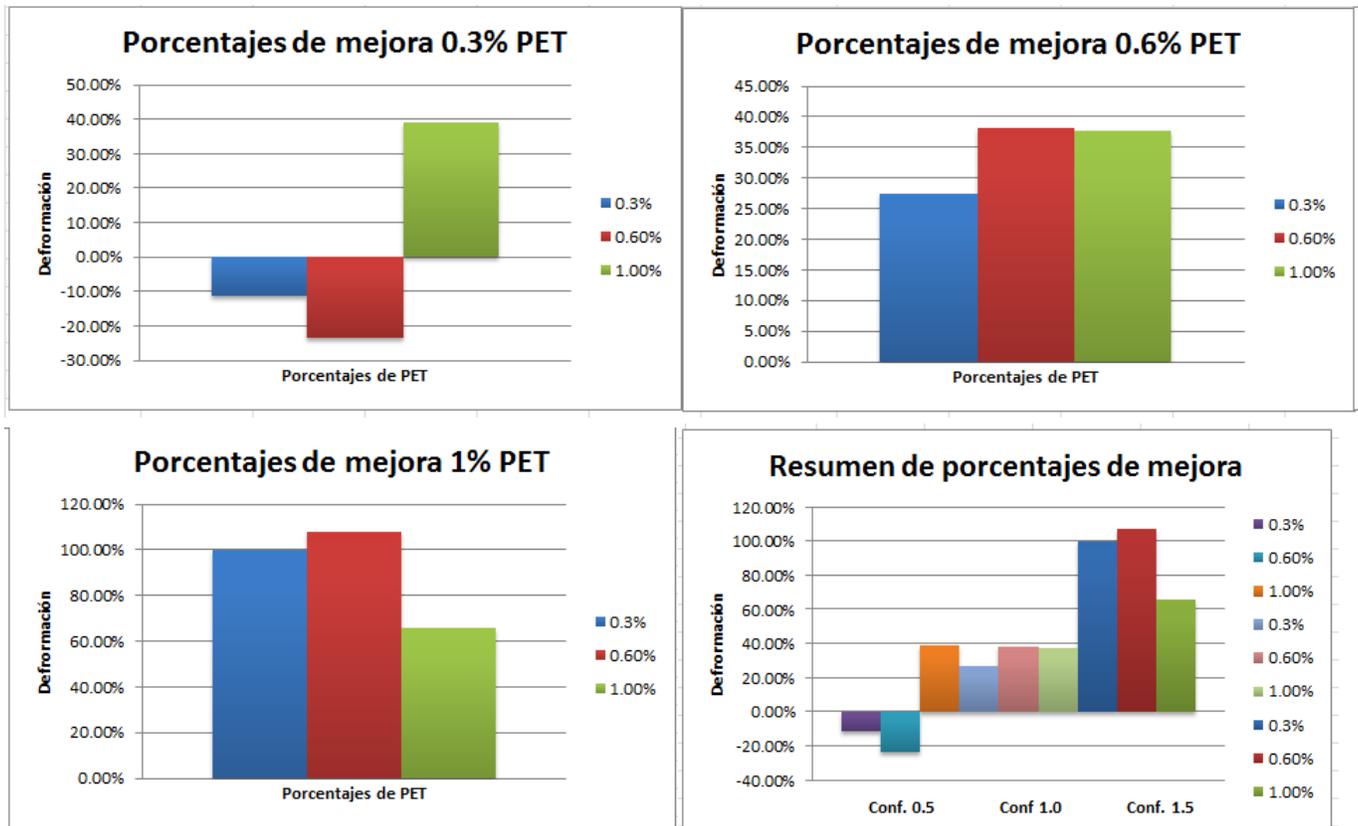


FIGURA 3.22 Gráficos comparativos de las mejoras obtenidas usando diferentes porcentajes de PET en las probetas ensayadas.

En forma de gráfica de barras se muestran las mejoras obtenidas en cada prueba.

En las pruebas realizadas con un confinamiento de 0.5 kg/cm^2 , las probetas que usaron 0.3% y 0.6% de fibras de PET tuvieron menor desempeño que las probetas de suelo natural; por otro lado, las probetas que usaron 1% de fibras de PET tuvieron una mejora notable. Esto se debe a que el PET le dio una mayor rigidez a la probeta.

ÓPTIMAS			
COMPARATIVO DE MEJORAS OBTENIDAS EN PROBETAS SIN PET VS PROBETAS CON PET			
PORCENTAJES DE PET	CONF. 5	CONF. 1.0	CONF. 1.5
0.0%	9.69%	10.35%	12.97%
0.3%	10.46%	6.82%	6.11%
MEJORA	-7.36%	51.76%	112.27%
0.0%	9.77%	10.47%	13.21%
0.60%	11.51%	7.04%	6.21%
MEJORA	-15.12%	48.72%	112.72%
0.0%	9.69%	10.35%	12.97%
1.00%	6.58%	7.52%	7.08%
MEJORA	47.26%	37.63%	83.19%

Tabla 3.20 Comparativo de deformación en las probetas ensayadas más favorables.

Como en la muestra anterior, el caso de las probetas que contenían 0.3% y 0.6% de fibras de PET con confinamiento de $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$, se sigue observando que existe mayor deformación en las probetas con respecto a las probetas de suelo natural. Esto marca una tendencia cuando existe poco confinamiento y este porcentaje de fibras de PET.

Así mismo las probetas que tenían 0.3% y 0.6% de fibras de PET obtuvieron los mejores resultados con un confinamiento de $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$, se nota una leve diferencia entre una y otra.

En conclusión, se puede notar que las probetas con mejores resultados para confinamientos mayores a $1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ son las que usaron 0.3% de fibras de PET y para confinamientos menores a este aquellas que tuvieron 1% de fibras de PET.

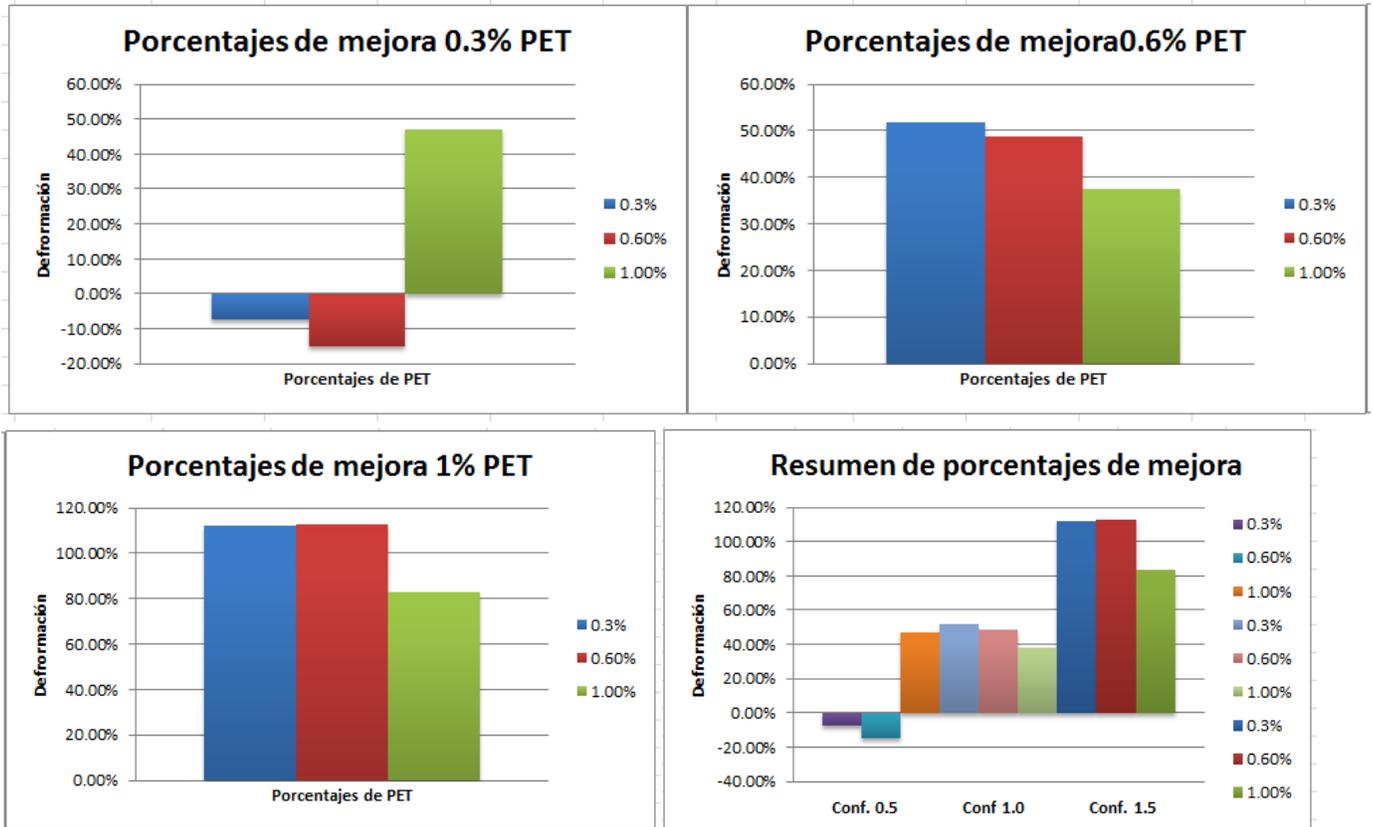


FIGURA 3.23 Gráficos comparativos de las mejoras obtenidas usando diferentes porcentajes de PET en las probetas ensayadas.

En las pruebas realizadas con un confinamiento de 0.5 kg/cm^2 , las probetas que usaron 0.3% y 0.6% de fibras de PET tuvieron menor desempeño que las probetas de suelo natural; por otro lado, las probetas que usaron 1% de fibras de PET tuvieron una mejora notable. Esto se debe a que el PET le dio una mayor rigidez a la probeta.

Para los confinamientos de 1.0 kg/cm^2 y 1.5 kg/cm^2 , destacan las probetas en las que se usó 0.3% de fibras de PET. Disputa muy de cerca a las probetas que usaron 0.6% de fibras de PET. Esto es muy importante ya que si se hiciera un análisis de viabilidad, podría tomarse en cuenta usar 0.3% de fibras de PET para ahorrar dinero y recurso.

4 PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

4.1 Introducción

Uno de los principales objetivos de esta tesis es que se puedan mejorar los suelos usando fibras de PET en proyectos reales de construcción, como en bordos para ríos o canales y muros de contención para presas. Se analizaron varios tipos de maquinaria para poder mezclar suelo con fibra de PET, sin embargo se consultó a ingenieros que han trabajado en construcción de bordos, terraplenes y formación de estructuras terreas y se pudo elegir de forma más puntual la maquinaria que se propondría para mezclar suelos con fibras de PET. También se plantean 2 métodos constructivos, uno en banco y otro en el lugar de la construcción.

4.2 Operaciones previas

Previo a construir es necesario hacer las siguientes operaciones:

- Levantamiento topográfico.
- Colocación de niveles.
- Colocación de trazos y referencias.
- Desbroce.
- Eliminación de capa vegetal.
- Escarificado del terreno subyacente.
- Cuantificar la cantidad de suelo a mejorar para determinar la cantidad y tipo de maquinaria que se usará.
- Determinar la cantidad de PET que se usará.

Además, dependiendo de la cantidad de suelo a mejorar, variará el procedimiento constructivo. Si es poca la cantidad de suelo a mejorar se requerirá menor maquinaria y diferente que para grandes volúmenes. También dependiendo del tiempo con el que se desee cumplir será necesario contar con uno o más frentes de obra.

4.3 Método constructivo

EJECUCIÓN DEL BORDO.

Una vez preparado el terreno sobre el que se asentará el bordo, se procederá su construcción.

La ejecución del mismo se compone de tres operaciones que se repiten cíclicamente para cada capa de material, hasta alcanzar la cota asignada en proyecto, estas operaciones son las siguientes:

- Extendido
- Humectación o desecación
- Compactación

EXTENDIDO.

Se procede al extendido del suelo en tongadas de espesor uniforme y sensiblemente paralela a la explanada. El material ha de ser homogéneo y uniforme. El espesor será lo suficientemente reducido para que, con los medios disponibles, se obtenga el grado de compactación exigible. Dicho espesor oscila entre los 15 a 20 cm de la tongada delgada en suelos finos o secos.

La maquinaria a emplear durante el extendido depende de la distancia de transporte:

- Para distancias inferiores a 500 m se emplea el bulldozer
- Si la distancia se halla entre 1 y 5 Km, se suele emplear la mototrailla para el transporte extendido.
- Para distancias superiores a 5 Km requiere el empleo de palas cargadoras, camiones o dumper para el transporte de tierras y motoniveladoras para el extendido.

HUMECTACIÓN.

Una vez extendida la tongada de suelo, se procede a acomodar sacos con fibras de PET y posterior a esto se acondiciona la humedad del suelo. Este proceso es muy importante ya que cumple una doble función:

- Asegurar una óptima compactación del material.
- Evitar que las variaciones de humedad que se produzcan después de la construcción provoquen cambios excesivos de volumen en el suelo, ocasionando daños y deformaciones en el firme.

Se tomará como la humedad de referencia la determinada en el ensayo de Proctor Normal, denominada humedad óptima Proctor. Su valor es cercano a la humedad de equilibrio que es la que alcanzará definitivamente el firme pasado un tiempo después de su construcción.

La maquinaria empleada en esta fase de construcción es generalmente un camión provisto de un tanque de agua.

COMPACTACIÓN.

Conseguido el grado de humectación óptimo se procede a la compactación del bordo. El objetivo de este proceso es aumentar la estabilidad y resistencia mecánica del mismo.

La maquinaria empleada en la compactación de bordos suelen ser compactadores, que son maquinas autopulsadas dotadas de cilindros con puntas de acero, también llamados patas de cabra.

TERMINACIÓN DEL TERRAPLÉN.

En esta última fase se realiza el cavado geométrico, se reperfilan taludes y la superficie donde posteriormente se asentará el firme. La maquinaria utilizada en este proceso de acabado final suele ser la motoniveladora o compactadores, con el fin de corregir irregularidades producidas por el paso de la maquinaria y sellar la superficie.

De acuerdo a la experiencia de ingenieros que se dedican a la construcción de carreteras este método puede ser usado para volúmenes inferiores al millón de metros cúbicos de suelo.

El cargador frontal será la principal herramienta para determinar la velocidad con la que se construirá, por tanto si se tienen más cargadores frontales o un cargador frontal de mayor capacidad se avanzara más rápido. Estos tienen la función de llenar los camiones que depositarán el suelo en camellones para el extendido.

4.4 Comparativa de estabilidad y deformación del bordo con diferentes porcentajes de fibras de PET.

Con el fin de demostrar la viabilidad de este proyecto, se propone un ejemplo de un bordo para canal sobre un suelo deformable. Se harán comparaciones de mejoramiento de estabilidad de talud con los diferentes porcentajes de fibra de PET planteados anteriormente (0.3%,0.6% y 1%) y el suelo natural sin reforzamiento de fibras de PET. La densidad del suelo se toma a partir del peso específico de las probetas reconstituidas para los ensayos de las pruebas triaxiales.

Borde propuesto:

- Altura: 3 metros.
- Pendiente: 1:5
- Corona: 3 metros
- Largo: 10 kilómetros
- Área de sección: 15 m²

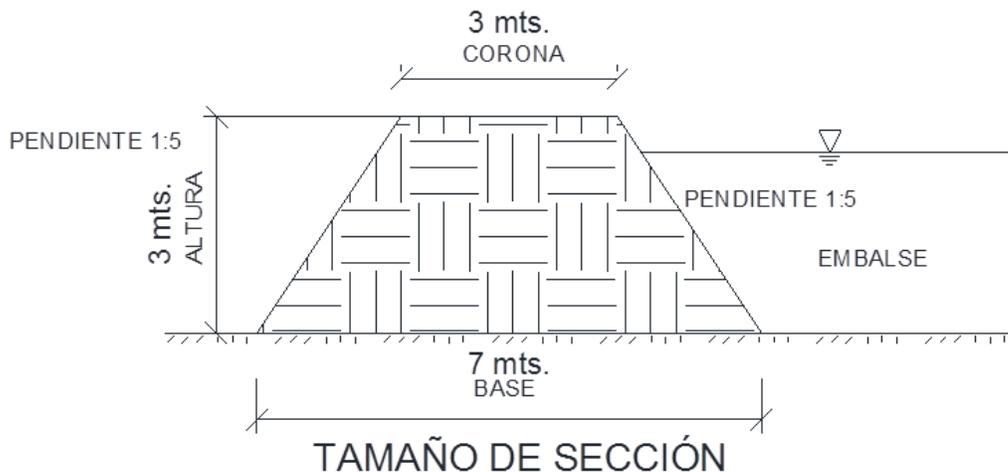


FIGURA 4.1 Sección tipo

Los taludes se analizarán con un método de dovelas (método de Fellenius ,1936) usando los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio. La densidad del suelo varía de acuerdo al porcentaje de fibras de PET utilizada en cada sección, se toma como referencia el peso húmedo de la probeta dividida entre el volumen de la misma de acuerdo al porcentaje de fibras de PET usado.

Las ecuaciones que se usarán para calcular la cantidad de fibras de PET en éste ejemplo son:

Volumen total de suelo: Área de sección x Largo (Ecuación 4.1)

Peso total del suelo: Volumen total de suelo x Peso del suelo (Ecuación 4.2)

Kilogramos de PET necesario = Volumen total del suelo x Peso total del suelo (Ecuación 4.3)

La simbología y ecuaciones para analizar el talud por el método de Fellenius son las siguientes:

Simbología.

Dovela: Número de secciones en las que se divide el talud para su análisis.

b: La base ó ancho del suelo con respecto al eje x de cada dovela.

Z1: Altura del suelo.

Zw: Altura del agua (sólo cuando se tiene)

α : Angulo obtenido desde la línea que tiene origen en cero e intercepta la línea entrecortada del talud.

c: Cohesión del suelo.

Φ : Angulo de fricción interna del suelo.

Ecuaciones.

$$W1: b \cdot Z1 \cdot \delta$$

$$u: 9.8 \cdot Zw$$

$$\text{Cos } \alpha$$

$$\text{Sen } \alpha$$

$$(c \cdot b) / \text{cos } \alpha$$

$$\text{Tan } \Phi \cdot (W1 \cdot \text{Cos } \alpha \cdot u) / \text{cos } \alpha$$

$$W1 \cdot \text{Sen } \alpha$$

$$\text{Factor de seguridad: } (((c \cdot b) / \text{cos } \alpha) + (\text{Tan } \Phi \cdot (W1 \cdot \text{Cos } \alpha \cdot (u \cdot b) / \text{cos } \alpha))) / (W1 \cdot \text{Sen } \alpha)$$

Ejemplo 1) Suelo natural sin reforzamiento de fibras de PET:

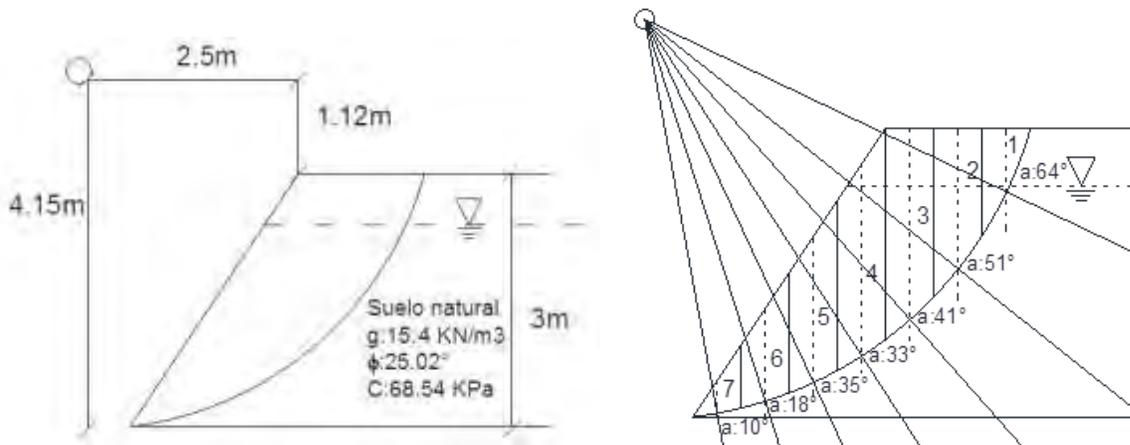


FIGURA 4.2 Centro de radio y dovelas del talud para caso sin de fibras de PET.

Dovela	b	Z1	Zw	W1	α	u	Cos α	Sen α
1	0.5	0.66	0.06	5.08	64	0.64	0.438	0.899
2	0.5	1.46	0.86	11.24	51	8.48	0.629	0.777
3	0.5	1.99	1.39	15.32	41	13.64	0.755	0.656
4	0.5	1.99	1.77	15.32	33	17.36	0.839	0.545
5	0.5	1.52	1.52	11.70	35	14.91	0.819	0.574
6	0.5	0.96	0.96	7.39	18	9.42	0.951	0.309
7	0.5	0.34	0.34	2.618	10	3.3354	0.985	0.174
Dovela	cb/cos α	Tan $\Phi(W1.Cosa.ub/cos\alpha)$		W1.Sen α				
1	78.28982	1.48065		4.56767				
2	54.53502	43.68190		8.73667				
3	45.47445	95.76399		10.05279				
4	40.92191	121.94408		8.34550				
5	41.89698	79.98739		6.71314				
6	36.08618	31.90633		2.28425				
7	34.84944	4.00214		0.45461				
Σ	332.05381	374.76435		40.70003				

Tabla 4.1 Resultado de ecuaciones para probetas sin reforzamiento de fibras de PET.

FS

17.36

Ec. 4.1

Volumen total de suelo: $15 \text{ m}^2 \times 10,000 \text{ m} = 150,000 \text{ m}^3$.

Ejemplo 2) Suelo natural con 0.3% de reforzamiento de fibras de PET:

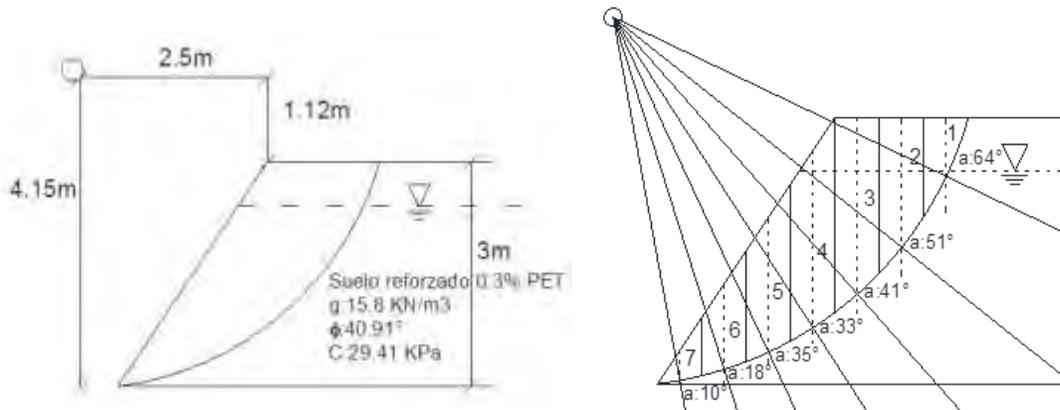


FIGURA 4.3 Centro de radio y dovelas del talud para caso con 0.3% de fibras de PET.

Dovela	b	Z1	Zw	W1	α	u	Cos α	Sen α
1	0.5	0.66	0.06	5.21	64	0.64	0.438	0.899
2	0.5	1.46	0.86	11.53	51	8.48	0.629	0.777
3	0.5	1.99	1.39	15.72	41	13.64	0.755	0.656
4	0.5	1.99	1.77	15.72	33	17.36	0.839	0.545
5	0.5	1.52	1.52	12.01	35	14.91	0.819	0.574
6	0.5	0.96	0.96	7.58	18	9.42	0.951	0.309
7	0.5	0.34	0.34	2.686	10	3.3354	0.985	0.174
Dovela	cb/cos α	Tan $\Phi(W1.Cos\alpha.ub/cos\alpha)$		W1.Sen α				
1	33.54463	1.51911		4.68631				
2	23.36648	44.81649		8.96360				
3	19.48432	98.25137		10.31390				
4	17.53370	125.11146		8.56227				
5	17.95149	82.06499		6.88751				
6	15.46175	32.73506		2.34358				
7	14.93185	4.10609		0.46642				
Σ	142.27422	384.49848		41.75718				

Tabla 4.2 Resultado de ecuaciones para probetas con reforzamiento de 0.3% de fibras de PET.

FS 12.61

Ec. 4.1

Volumen total de suelo: $15 \text{ m}^2 \times 10,000 = 150,000 \text{ m}^3$.

Ec. 4.2

Peso total del suelo = $150,000 \text{ m}^3 \times 850 \text{ kg/m}^3 = 127,500,000 \text{ kilogramos} = 127,500 \text{ toneladas}$.

Ec. 4.3

Kilogramos de PET necesario = $127,500,000 \text{ kilogramos} \times 0.3\% = 382,500 = 382.5 \text{ toneladas}$.

Ejemplo 3) Suelo natural con 0.6 % de reforzamiento de fibras de PET:

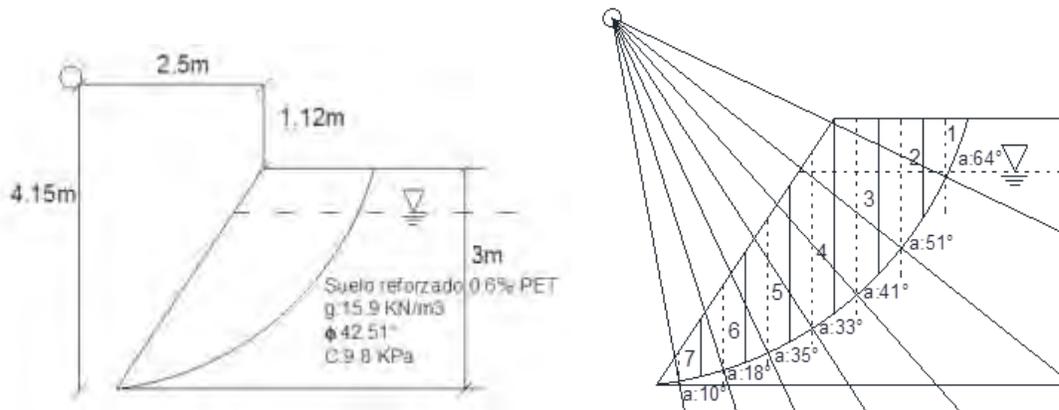


FIGURA 4.4 Centro de radio y dovelas del talud para caso con 0.6% de fibras de PET.

Dovela	b	Z1	Zw	W1	α	u	Cos α	Sen α	
1	0.5	0.66	0.06	5.25	64	0.64	0.438	0.899	
2	0.5	1.46	0.86	11.61	51	8.48	0.629	0.777	
3	0.5	1.99	1.39	15.82	41	13.64	0.755	0.656	
4	0.5	1.99	1.77	15.82	33	17.36	0.839	0.545	
5	0.5	1.52	1.52	12.08	35	14.91	0.819	0.574	
6	0.5	0.96	0.96	7.63	18	9.42	0.951	0.309	
7	0.5	0.34	0.34	2.703	10	3.3354	0.985	0.174	
Dovela	cb/cosα	Tan Φ(W1.Cosα.ub/cosα)		W1.Senα					
1	11.17774	1.52873		4.71597					
2	7.78618	45.10014		9.02033					
3	6.49256	98.87321		10.37918					
4	5.84258	125.90330		8.61646					
5	5.98180	82.58439		6.93110					
6	5.15216	32.94225		2.35842					
7	4.97559	4.13208		0.46937					
Σ	47.40861	386.93202		42.02146					

Tabla 4.3 Resultado de ecuaciones para probetas con reforzamiento de 0.6% de fibras de PET.

FS = 10.34

Ec. 4.1

Volumen total de suelo: $15 \text{ m}^2 \times 10,000 \text{ m} = 150,000 \text{ m}^3$

Ec. 4.2

Peso total del suelo = $150,000 \text{ m}^3 \times 850 \text{ kg/m}^3 = 127,500,000 \text{ kilogramos} = 127,500 \text{ toneladas}$

Ec. 4.3

Kilogramos de PET necesario = $127,500,000 \text{ kilogramos} \times 0.6\% = 765,000 \text{ kilogramos} = 765 \text{ toneladas}$

Ejemplo 4) Suelo natural con 1.0% de reforzamiento de fibras de PET:

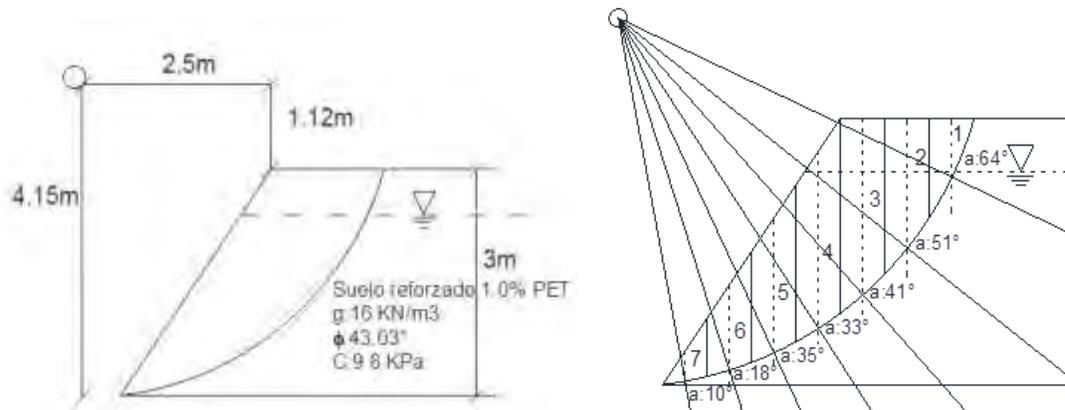


FIGURA 4.5 Centro de radio y dovelas del talud para caso con 1% de fibras de PET.

Dovela	b	Z1	Zw	W1	α	u	Cos α	Sen α
1	0.5	0.66	0.06	5.28	64	0.64	0.438	0.899
2	0.5	1.46	0.86	11.68	51	8.48	0.629	0.777
3	0.5	1.99	1.39	15.92	41	13.64	0.755	0.656
4	0.5	1.99	1.77	15.92	33	17.36	0.839	0.545
5	0.5	1.52	1.52	12.16	35	14.91	0.819	0.574
6	0.5	0.96	0.96	7.68	18	9.42	0.951	0.309
7	0.5	0.34	0.34	2.72	10	3.3354	0.985	0.174
Dovela	cb/cos α	Tan $\Phi(W1.Cos\alpha.ub/cos\alpha)$		W1.Sen α				
1	11.17774	1.53834		4.74563				
2	7.78618	45.38379		9.07706				
3	6.49256	99.49506		10.44446				
4	5.84258	126.69515		8.67065				
5	5.98180	83.10379		6.97469				
6	5.15216	33.14943		2.37325				
7	4.97559	4.15807		0.47232				
Σ	47.40861	389.36555		42.28575				

Tabla 4.4 Resultado de ecuaciones para probetas con reforzamiento de 1% de fibras de PET.

FS

10.33

Ec. 4.1

Volumen total de suelo: $15 \text{ m}^2 \times 10,000 \text{ m} = 150,000 \text{ m}^3$

Ec. 4.2

Peso total del suelo = $150,000 \text{ m}^3 \times 850 \text{ kg/m}^3 = 127,500,000 \text{ kilogramos} = 127,500 \text{ toneladas}$

Ec. 4.3

Kilogramos de PET necesario = $127,500,000 \text{ kilogramos} \times 1.0\% = 1,275,000 \text{ kilogramos} = 1,275 \text{ toneladas}$

Considerando los valores antes mostrados de los módulos de elasticidad obtenidos de las probetas remoldeadas, se hicieron los cálculos para poder determinar la deformación esperada en cada borde. Recordando que el borde tiene 3 metros de altura y que las probetas ensayadas con confinamiento de 0.5kg/cm² son igual a 1.98 metros de profundidad, se tomó el módulo de elasticidad de esas probetas y de esta forma se calculó de manera más directa la deformación esperada de cada bordo.

La ecuación empleada para el cálculo fue:

$$\Delta L: \frac{F * L}{A * E}$$

Ecuación 4.4 Cálculo de la deformación esperada.

Donde:

F: Peso propio del suelo.

L: Longitud

A: Área de la sección.

E: Módulo de elasticidad

DEFORMACIÓN ESPERADA EN EL TERRAPLEN				
PORCETANJES DE FIBRA DE PET	SIN PET	0.3% PET	0.6% PET	1% PET
DEFORMACIÓN DEL TERRAPLEN A 1 MT. DE PROFUNDIDAD	0.164	0.152	0.147	0.117
DEFORMACIÓN DEL TERRAPLEN A 2 MT. DE PROFUNDIDAD	0.384	0.356	0.344	0.275

Tabla 4.5 Deformaciones esperadas en los bordos.

Se observa que al usar fibras de PET como material de refuerzo el bordo tiene menor deformación. Se puede explicar porque las fibras refuerzan el suelo y permiten que se adapte a las condiciones de deformabilidad impuestas sin sufrir agrietamiento. Si bien el factor de seguridad, para la situación analizada disminuye en función del incremento de la fibra de PET, este factor sigue siendo suficiente para que el bordo se mantenga en operación sin riesgo. Finalmente esto implica que el suelo reforzado con la fibra 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.

Maquinaria propuesta:

Por la cantidad de suelo de este ejemplo se recomienda hacer el mezclado de suelo con PET en campo, usando:

- Camiones de 14 m³ para el acarreo de material
- Motoniveladora tipo 12H
- Al menos un cargador frontal de 4 m³
- PIPA de agua de 10,000 m³

Cuando se haga la selección del cargador frontal deberá revisarse el rendimiento que tiene por jornada laboral, ya que será el que de la pauta para la duración del proyecto, si se desea terminar rápido puede considerarse usar mas de un cargador frontal.

Esta construcción podría realizarse en aproximadamente 3 meses.

5 CONCLUSIONES

5.1 Pruebas de laboratorio:

El reforzamiento de suelos con fibras de PET recicladas presenta una mejora bastante considerable ya que se tiene una mejor resistencia y el suelo presenta una mayor capacidad de deformación.

5.2 Generales:

Uno de los posibles usos de las fibras de PET en estructuras terreas son bordos para lagos, ríos, presas de tierra y muros de contención, es común que este tipo de estructuras presentan fallas de agrietamiento. Con el uso de fibras de PET podría reducirse este problema ya que le daría mayor ductilidad a la estructura. En las pruebas ensayadas solo se presenta el efecto de abarrilamiento.

En los círculos de Mohr se observa que existe una menor cohesión, esto se debe a que las fibras de PET no permiten el contacto de las partículas de suelo entre si. Aun así, las probetas tienen mucha rigidez. Es necesario seguir haciendo pruebas de laboratorio para determinar algún método más preciso y diseñar de manera más apropiada taludes con reforzamiento de fibras de PET.



FIGURA 5.1 Probeta de suelo natural reforzada con fibras de PET al terminar un ensaye.

De acuerdo con Rogelio Varela columnista y corporativo del Periódico “El financiero”, dice que la ECOCE afirma que México es líder en América Latina en el reciclado de PET al acumular más de 2 millones de toneladas de envases en el año pasado. Esto es muy importante ya que para hacer viable un proyecto de este tipo se necesita incentivar el reciclaje de estos productos.

Por otro lado en Toluca, Edo. De México, la marca Coca-Cola y sus socias embotelladoras inauguraron la planta de reciclado de PET grado alimenticio, PETStar, considerada la más grande del mundo, esto permite que se reciclen más envases de PET y que le de viabilidad a un proyecto de suelo mejorado con fibras de PET sea posible.

Por ultimo, actualmente parecería difícil construir una estructura de este tipo debido a que se necesitan muchas toneladas de fibra de PET, pero es necesario seguir incentivando el reciclado masivo de envases de PET para poder llevar acabo una obra de este tipo.

BIBLIOGRAFIA

Libros

- Mecánica de suelos y cimentaciones – Carlos Crespo Villalaz – Editorial Limusa 5ª ed. 2004
- Mecánica de suelos – Eulalio Juárez Badillo – Editorial Limusa Año 2007

Tesis

- Aspectos constructivos en la técnica de compactación dinámica para mejoramiento masivo de suelos – Darío Arriaga Vázquez 2006
- Estudio del uso de polietileno tereftalato como material de refuerzo de estructuras térreas conformadas por suelo fino – Guillermo Francisco Sherwell Betancourt 2014

Apuntes escolares

- Apuntes en clase de la materia “Geotecnia aplicada a la construcción” - Maestría en construcción UNAM

Paginas web

- El ecologista
http://www.elecologista.com.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=108&Itemid=65
- Recimex
<http://www.recimex.com.mx/blog/?p=153>
- Diario Milenio: Coca Cola inaugura planta de reciclaje en Toluca
http://www.milenio.com/negocios/coca_cola-planta-pet-reciclado_0_336566573.html
- El universal: Bajo tierra, el negocio de reciclaje de PET
<http://www.eluniversal.com.mx/notas/812230.html>
- Gobierno del Distrito Federal – Secretaria del medio ambiente.
<http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/04/01clave.pdf>
- Periódico el financiero: Opinión- México, líder en reciclaje de PET por Rogelio Varela
<http://www.elfinanciero.com.mx/opinion/mexico-lider-en-reciclaje-de-pet.html>
- Fibras sintéticas
<http://todosobrelasfibrassinteticas.blogspot.mx/2013/02/fibras-sinteticas-y-especialesel.html>
- Maquinaria pesada
<http://www.maquinariapesadas.org/>
- Devela, método de Fellenius
<https://www.youtube.com/watch?v=b6t0XD4uY3g>

Artículos

- *Ecoce, Concamin, ANIP*
- Al-Refeai, T. (1991): Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 10, pp. 319–335.
- Andersland, O. B., and Khattak, A. S., (1979), Shear Strength of Kaolinite/Fiber Soil Mixtures, *Proceedings, International Conference on Soil Reinforcement*, Vol. I, Paris, France, pp. 11-16.

- Arvind Kumar, Walia, B.S. And Jatinder Mohan (2006), Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay, *Journal of Construction and building materials*, Elsevier Ltd., U.K, Vol. 20, Issue 10, pp.1063-1068.
- Consoli, N. & Prietto, D.M. (1998), Influence of fiber and cement addition in sandy soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, Issue 12, pp. 1211-1214
- Consoli, N. C. Casagrande, M. D. T. Prietto and P. D. M. Thome, A. (2003), Plate Load Test on Fiber-Reinforced Soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 129, pp. 951-955
- Gray, D. H., and Ohashi, H., (1983), Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 3, pp. 335-353.
- Gray, D.H., and Al -Refai, T.O., (1986), Behavior of Fabric versus Fiber-Reinforced Sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 112, No. 8, pp. 804-820.
- H. Ghiassian, G. Poorebrahim and Donald H. Gray (2004), Soil reinforcement with recycled carpet wastes, *Waste Management Research*, 22, pp. 108–114
- K. Ghavami, Romildo D. Toledo Filho, and Normando P. Barbosac (1999), Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, pp. 39-48
- Maher, M. H., and Gray D. H., (1990), Static Response of Sand Reinforced with Randomly Distributed Fibers, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 11.
- N. M. Al-Akhras, M. F. Attom, K. M. Al-Akhras and A. I. H. Malkawi (2008), Influence of fibers on swelling properties of clayey soil, *Geosynthetics International Journal*, Issue 15, No. 4, pp. 304–309
- Ranjan, G., Vasan, R.M. and Charan, H.D. (1996), Probabilistic analysis of randomly distributed fiber reinforced soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 122, pp. 419–426.
- Wang Y. (1999), Utilization of Recycled Carpet Wasnd Soil, *Journal of Polymer-PlasticTechnology Engineering*, Vol.38, No. 3, PP. 533-546

Índice de figuras

1. MARCO TEÓRICO.

Pág. 15 Figura 1.1 Formula química del PET.

Pág. 15 Figura 1.2 Whinfield y Dickson, inventores de la fibra de PET.

Pág. 16 Figura 1.3 Producción mundial de poliéster de fibra cortada histórico y estimación futura.

Pág. 16 Figura 1.4 Producción mundial de plásticos por país y región.

Pág. 17 Figura 1.5 Usos y aplicaciones del PET.

Pág. 19 Figura 1.6 PET y sus productos en México.

Pág. 20 Figura 1.7 Precio del PET reciclado.

Pág. 21 Figura 1.8 Agua en una partícula arcillosa.

Pág. 24 Figura 1.9 Círculo de Mohr.

Pág. 25 Figura 1.10 Curva de esfuerzo deformación.

Pág. 28 Figura 1.11 Tipos de falla a) Falla plástica, b) Falla frágil y c) Falla intermedia.

Pág. 29 Figura 1.12 Envoltentes representativas de Coulomb para pruebas de corte rápidas: (a) Arcilla saturada, (b) Arcilla sobre consolidada, (c) Arcilla arenosa o limo.

Pág. 32 Figura 1.13 Resultado de la técnica de mezclado #3

Pág. 32 Figura 1.14 Grados de disgregación (J.L. Escorio 1964)

2. MODELO TEÓRICO.

Pág. 36 Figura 2.1 a) Pisón desarmado b) Molde partido desarmado c) Molde partido armado.

Pág. 38 Figura 2.2 Cribado del suelo a través de malla #60.

Pág. 38 Figura 2.3 Suelo cribado por malla #60.

Pág. 39 Figura 2.4 Copa casa grande.

Pág. 40 Figura 2.5 Determinación de límite líquido.

Pág. 42 Figura 2.6 Equipo para determinar densidad de sólidos.

Pág. 43 Figura 2.7 Espécimen para determinar peso específico.

Pág. 43 Figura 2.8 Material cribado por malla #60.

Pág. 44 Figura 2.9 Representación gráfica de golpes dados con el pisón para formar probetas.

Pág. 46 Figura 2.10 Llenado de molde para formar probetas.

Pág. 46 Figura 2.11 Uso del pisón para formar probetas.

3. RESULTADO DE LAS PRUEBAS.

Pág. 51 Figura 3.1 Gráfico límite líquido.

Pág. 52 Figura 3.2 Gráfica de clasificación SUCS.

Pág. 53 Figura 3.3 Dimensiones del cubo para determinar el peso específico del suelo.

Pág. 55 Figura 3.4 Gráfica del peso volumétrico seco.

Pág. 55 Figura 3.5 Gráfica del peso volumétrico húmedo.

Pág. 56 Figura 3.6 Resultados de los círculos de Mohr de las probetas sin reforzamiento de fibras de PET.

Pág. 57 Figura 3.7 Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 0.3% de fibras de PET.

Pág. 58 Figura 3.8 Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 0.6% de fibras de PET.

Pág. 59 Figura 3.9 Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 1.0% de fibras de PET.

Pág. 60 Figura 3.10 Probeta de suelo natural con confinamiento de 0.5 kg/cm².

Pág. 60 Figura 3.11 Probeta de suelo natural con confinamiento de 1.0 kg/cm².

Pág. 61 Figura 3.12 probeta de suelo natural con confinamiento de 1.5 kg/cm².

Pág. 61 Figura 3.13 Probeta de suelo natural reforzada con 0.3% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm².

Pág. 62 Figura 3.14 Probeta de suelo natural reforzada con 0.3% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm².

Pág. 62 Figura 3.15 Probeta de suelo natural reforzada con 0.3% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm².

Pág. 63 Figura 3.16 Probeta de suelo natural reforzada con 0.6% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm².

Pág. 63 Figura 3.17 Probeta de suelo natural reforzada con 0.6% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm².

Pág. 64 Figura 3.18 Probeta de suelo natural reforzada con 0.6% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm².

Pág. 64 Figura 3.19 Probeta de suelo natural reforzada con 1% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm².

Pág. 65 Figura 3.20 Probeta de suelo natural reforzada con 1% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm².

Pág. 65 Figura 3.21 Probeta de suelo natural reforzada con 1% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm².

Pág. 70 Figura 3.22 Gráficos comparativos de las mejoras obtenidas usando diferentes porcentajes de PET en las probetas ensayadas.

Pág. 72 Figura 3.23 Gráficos comparativos de las mejoras obtenidas usando diferentes porcentajes de PET en las probetas ensayadas.

4. PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Pág. 76 Figura 4.1 Sección tipo.

Pág. 78 Figura 4.2 Centro de radio y dovelas del talud para caso sin fibras de PET.

Pág. 79 Figura 4.3 Centro de radio y dovelas del talud para caso con 0.3% de fibras de PET.

Pág. 80 Figura 4.4 Centro de radio y dovelas del talud para caso con .6% de fibras de PET.

Pág. 81 Figura 4.5 Centro de radio y dovelas del talud para caso con 1% de fibras de PET.

5. CONCLUSIONES

Pág. 84 Figura 5.1 Probeta de suelo natural reforzada con fibras de PET al terminar un ensaye.

Índice de ecuaciones

1. MARCO TEÓRICO

Pág. 22 Ecuación 1.1 Contenido de humedad

Pág. 22 Ecuación 1.2 Resistencia al corte

Pág. 23 Ecuación 1.3 Envolvente de falla

Pág. 24 Ecuación 1.4 Esfuerzo efectivo

Pág. 24 Ecuación 1.5 Esfuerzo efectivo

Pág. 26 Ecuación 1.6 Energía específica

Pág. 31 Ecuación 1.7 Contenido o concentración de la fibra de refuerzo.

2. MODELO TEÓRICO

Pág. 37 Ecuación 2.1 Energía específica para probetas

Pág. 49 Ecuación 2.2

Pág. 49 Ecuación 2.3

3. RESULTADO DE LAS PRUEBAS

Pág. 50 Ecuación 3.1 Contenido de humedad.

Pág. 65 Ecuación 3.2 Módulo de elasticidad.

4. PROPUEST DE PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Pág. 75 Ecuación 4.1 Volumen total de suelo: Área de sección x Largo

Pág. 75 Ecuación 4.2 Peso total del suelo: Volumen total de suelo x Peso del suelo

Pág. 75 Ecuación 4.3 Kilogramos de PET necesario = Volumen total del suelo x Peso total del suelo.

Pág. 81 Ecuación 4.4 Cálculo de la deformación esperada.

Índice de tablas

2. MODELO TEÓRICO

Pág. 35 Tabla 2.1 Descripción de la fibra de PET

3. RESULTADO DE LAS PRUEBAS

Pág. 50 Tabla 3.1 Resultados de la prueba de límite plástico

Pág. 50 Tabla 3.2 Resultados de la prueba de límite líquido

Pág. 54 Tabla 3.3 Resultados de la densidad de sólidos

Pág. 54 Tabla 3.4 Resultados del peso específico

Pág. 54 Tabla 3.5 Determinación de la humedad óptima

Pág. 54 Tabla 3.6 Resultados del peso volumétrico seco

Pág. 55 Tabla 3.7 Resultados del peso volumétrico húmedo

Pág. 56 Tabla 3.8 Resultados para el trazo de los círculos de Mohr sin reforzamiento de fibras de PET.

Pág. 56 Tabla 3.9

Pág. 57 Tabla 3.10 Resultados para el trazo de los círculos de Mohr con 0.3% de fibras de PET.

Pág. 57 Tabla 3.11

Pág. 58 Tabla 3.12 Resultados para el trazo de los círculos de Mohr con 0.6% de fibras de PET.

Pág. 58 Tabla 3.13

Pág. 65 Tabla 3.14 Módulo de elasticidad para probetas sin reforzamiento de fibras de PET.

Pág. 65 Tabla 3.15 Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 0.3% de fibras de PET.

Pág. 66 Tabla 3.16 Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 0.6% de fibras de PET.

Pág. 66 Tabla 3.17 Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 1.0% de fibras de PET.

Pág. 67 Tabla 3.18 Porcentajes de deformación usando 0%, 0.3%, 0.6% y 1% de PET.

Pág. 68 Tabla 3.19 Comparativo de deformación en las probetas ensayadas menos favorables.

Pág. 70 Tabla 3.20 Comparativo de deformación en las probetas ensayadas más favorables.

4. PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Pág. 77 Tabla 4.1 Resultado de ecuaciones para probetas sin reforzamiento de fibras de PET.

Pág. 78 Tabla 4.2 Resultado de ecuaciones para probetas con reforzamiento de 0.3% de fibras de PET.

Pág. 79 Tabla 4.3 Resultado de ecuaciones para probetas con reforzamiento de 0.6% de fibras de PET.

Pág. 80 Tabla 4.4 Resultado de ecuaciones para probetas con reforzamiento de 1% de fibras de PET.

Pág. 81 Tabla 4.5 Deformaciones esperadas en los bordos.