

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DE ADITIVOS
QUÍMICOS Y RELLENOS EN LA EFECTIVIDAD DE LA
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ORGÁNICOS CON CEMENTO**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Wilson Giancarlos Chauca Reyes

ASESOR

Marko Antonio López Bendezú

Lima, octubre, 2021.

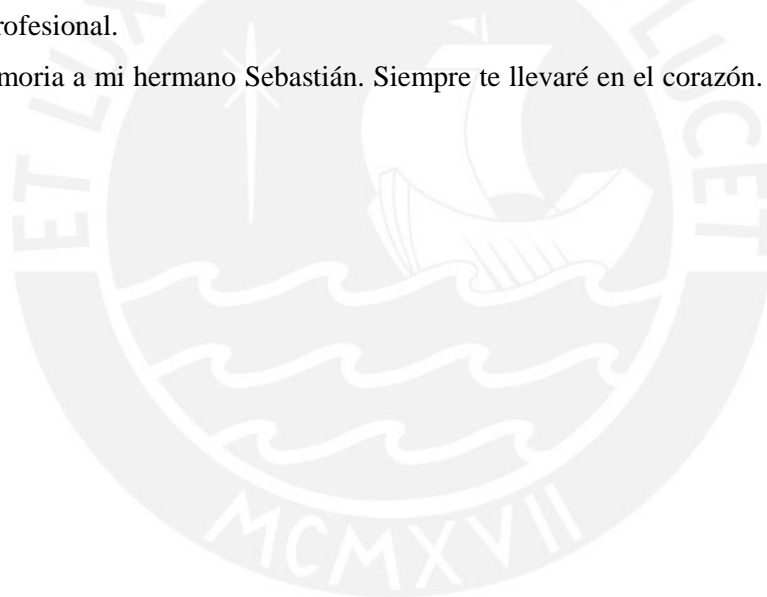
AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que de una manera u otra permitieron la realización de este trabajo. En especial agradezco a mi madre Fanny, que con su comprensión y amor infinito siempre estuvo presente, que sin escatimar esfuerzos ha sacrificado mucho por mí y por mi hermano, siempre con la ilusión de vernos siendo personas de bien. Nunca podré agradecerle tanto por lo mucho que ha hecho por nosotros. De igual forma agradezco a mi padre William, quien confió en mí y me dio la oportunidad de estudiar en una casa de estudios tan prestigiosa como la Universidad Católica.

Así mismo agradezco a mi asesor de tesis, Dr. Marko Lopez, quien con su mentoría me guió a poder realizar este trabajo del cual estoy orgulloso.

Agradezco además a toda mi familia y amigos cercanos que creyeron en mí. A mis maestros que a lo largo de mi carrera compartieron sus conocimientos para lograr que este trabajo llegue a su fin. A mi casa de estudios que me brindó todas las herramientas para poder realizar este trabajo y ser un mejor profesional.

En memoria a mi hermano Sebastián. Siempre te llevaré en el corazón. Esto también es gracias a ti.



RESUMEN

Las turbas son una forma de suelos extremadamente blandos, que a diferencia de los suelos minerales, poseen características diferentes que las formas en que las fórmulas y estudios se aplican sobre ellos son diferentes. Su baja resistencia, elevada deformación, alta compresibilidad, potencial de descomposición, elevada acidez, alta humedad y alta permeabilidad, hacen que estos suelos sean un problema para la ingeniería geotécnica al momento de planificar un proyecto. Las turbas pueden ser estabilizadas con cemento ya que entre todos los demás aglutinantes es el que ha resultado ser más efectivo. Sin embargo, por la misma complejidad de la turba, en ocasiones se necesitan grandes cantidades de cemento para poder estabilizarla, pudiendo volver un proyecto insostenible económicamente y ecológicamente. Por lo tanto, elegir un método de curado correcto y adicionalmente agregar otros aditivos y/o rellenos pueden mejorar la efectividad de una estabilización de turbas. Esta investigación documental se ha basado en recolectar información académica sobre estabilización de turbas con cemento, para así poder relacionar y comparar los métodos más eficaces para estabilizar suelos de turba en función al tipo de turba estabilizada. La recopilación documental mostró que, efectivamente, la aplicación de otros aditivos y rellenos en conjunto con el cemento muestran mejoras notables a comparación de utilizar solo cemento como único aglutinante. Así mismo, tener en cuenta el método de curado a utilizar es importante en la efectividad pues estos son un reflejo de lo que se aplicaría en campo, siendo el curado en aire y el curado húmedo con sobrecarga los métodos más efectivos. Es así que un suelo tan problemático como la turba puede ser estabilizada efectivamente sin la necesidad de utilizar cemento en grandes cantidades si se conocen bien sus propiedades y si se elige bien el método de curado y que aditivos y/o rellenos son los más eficaces.

Palabras clave: *aditivo, cemento, estabilización, relleno, suelo orgánico, turba*

Índice

1. Introducción	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Justificación	3
1.3. Hipótesis.....	3
1.4. Objetivos	3
2. Metodología	5
3. Marco teórico	7
3.1. Suelos orgánicos y turbas	7
3.1.1. Definición	7
3.1.2. Clasificación	7
3.1.3. Propiedades ingenieriles	8
3.2. Ensayos químicos	9
3.3. Problemas con turbas	10
3.3.1. Compresibilidad de la turba	10
3.3.2. Resistencia al corte de la turba.....	10
3.3.3. Problemas desde el punto de la ingeniería geotécnica	11
3.4. Mejora de suelos.....	11
3.4.1. Métodos de mejora de suelo para turbas	13
3.4.2. Estabilización suelo-cemento.....	14
3.4.3. Estabilización de turba con cemento.....	15
4. Efecto de técnicas de curado sobre la resistencia de la turba estabilizada.....	17
4.1. Métodos de curado en la estabilización de turbas.....	17
4.1.1. Curado en aire	17
4.1.2. Curado húmedo.....	18
4.1.3. Curado húmedo con sobrecarga.....	19
4.2. Influencia de los métodos de curado sobre la resistencia de la turba estabilizada con cemento	19
5. Efecto del uso de aditivos y rellenos adicionales en la estabilización de turbas con cemento	27
5.1. Efectos de rellenos en turbas estabilizadas con cemento.....	27
5.2. Efectos de aditivos en turbas estabilizadas con cemento.....	34
5.2.1. Aditivos químicos	35
5.2.2. Aditivos no reactivos	43

6. Relación y comparación de métodos de estabilización con los distintos tipos de turbas	47
.....	
6.1. Estabilización en turba fibrosa (H₁ – H₄)	48
6.2. Estabilización en turba hémica (H₅ – H₇)	50
6.3. Estabilización en turba sáprica (H₈– H₁₀)	52
6.4. Discusión	53
7. Conclusiones y recomendaciones	54
8. Bibliografía	56
Anexo A: Tablas	59



Lista de Figuras

Figura 3.1: Muestreador de turbas (Traducido de Kalantari et al., 2014).	9
Figura 3.2: Asentamiento a largo plazo de un edificio de bajo peso construido sobre turba de Poncia (Dehghanbanadak et al., 2016).	10
Figura 3.3: Precarga y drenaje vertical (Traducido de Huat et al., 2014).	13
Figura 3.4: Combinación de estabilización de masa y columna (Traducido de EuroSoilStab, 2002). .	14
Figura 3.5: Relación general entre la dosis de aglutinante y la resistencia al corte en suelos de turba (Traducido de Dehghanbanadaki et al., 2013)	16
Figura 4.1: Muestras durante etapa de curado en aire (Kalantari y Prasad, 2014).....	18
Figura 4.2: Muestras durante etapa de curado húmedo (Kalantari y Prasad, 2014).....	19
Figura 4.3: Muestras durante etapa de curado húmedo con sobrecarga (Kalantari y Prasad, 2014)	19
Figura 4.4: UCS de muestras curado: a) 15% OPC; b) 30% de OPC; c) 50% de OPC (Adaptado de Kalantari y Prasad, 2014).....	21
Figura 4.5: Valores UCS en función del tiempo para diferentes tasas de recargo y con una dosis de aglutinante de 300 kg / m ³ (Adaptado de Skels et al., 2013).....	26
Figura 5.1: Astillas de llantas trituradas. Las dimensiones de cada una son 20 x 15 x 0.5 mm (Saberian y Rahgozar, 2016).....	33
Figura 5.2: a) Fibras de polipropileno y b) Fibras de acero (Kalantari y Huat, 2010).....	43
Figura 5.3: Valores UCS de turba estabilizada con turba y fibras de polipropileno (adaptado de Kalantari et al., 2008).	44

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Términos y símbolos de calificación para Turbas (Huat et al., 2014).	8
Tabla 3.2: Rangos de contenido orgánico (ASTM D4427) (Huat et al., 2014).	8
Tabla 3.3: Minerales de clínker que actúan como compuestos principales que mejoran la resistencia del cemento Portland ordinario (Janz y Johansson, 2002).	15
Tabla 4.1: Propiedades de turba de Kampung Jawa, Malasia (Adaptado de Kalantari y Prasad, 2014).	20
Tabla 4.2: Propiedades de la turba de Poncia, Malasia (Adaptado de Dehghanbanadaki et al., 2016).	21
Tabla 4.3: Propiedades de la turba de Kampung Meranek en Malasia (Rahmi et al., 2018).	24
Tabla 4.4: Propiedades de turba extraída en la región de Riga, Letonia (Skels et al., 2013).	26
Tabla 5.1: Propiedades de suelo de turba del suroeste de China (adaptado de Wang et al., 2013).	30
Tabla 5.2: Resultados UCS de turba estabilizada (adaptado de Wang et al., 2020).	31
Tabla 5.3: Propiedades de suelo de turba del humedal Chaghakhor, Iran (Adaptado de Saberian y Rahgozar, 2016a).	33
Tabla 5.4: Resultados de la prueba UCS de turba estabilizada con distintas dosis de cemento (adaptado de Saberian y Rahgozar, 2016).	34
Tabla 5.5: Aumento de la resistencia relativa basado en pruebas de laboratorio (resistencia a la compresión no confinada después de 28 días de curado) en suelos nórdicos (adaptado de EuroSoilStab, 2002).	35
Tabla 5.6: Propiedades de turba de Kampung, Jawa – Malasia (Adaptado de Kalantari, 2011)	36
Tabla 5.7: Resultados de pruebas de resistencia en suelo de turba (adaptado de Kalantari, 2011).	37
Tabla 5.8: Resultado de pruebas UCS y CBR (Adaptado de Kalantari et al., 2011).	38
Tabla 5.9: Propiedades de turba del estado de Selango, Malasia (Adaptado de Wong et al., 2013a).	40
Tabla 5.10: Composiciones químicas cemento OPC y PCC.	40
Tabla 5.11: Resultados de prueba UCS a los 7 días de curado (Adaptado de Wong et al., 2013a)	41
Tabla 5.12: Propiedades de turba del área de Klang, Malasia (Adaptado de Wong et al., 2013b).	42
Tabla 6.1: Comparación de valores UCS y de pH en turba fibrosa	48
Tabla 6.2: Comparación de valores UCS en turba hémica	50
Tabla 6.3: Comparación de valores UCS y pH en turba sáprica	52

1. Introducción

1.1. Generalidades

Los tratamientos de terrenos son un tema de estudio muy importante para la ingeniería, pues son una alternativa económica y práctica para lograr las propiedades y especificaciones geotécnicas requeridas para la construcción de una estructura, ya sean edificaciones o carreteras. Se aplican para mejorar suelos inadecuados que tienen una baja capacidad portante, una elevada deformación ante la aplicación de cargas, con nivel freático superficial, en zonas potencialmente licuables, entre otros (Huat et al., 2014).

Los suelos orgánicos y turbas, son una forma extrema de suelos blandos y están sujetas a problemas de inestabilidad como hundimiento local y desarrollo de fallas por deslizamiento; también están sujetos a asentamientos primario masivo y a largo plazo cuando se somete a aumentos de carga incluso moderado (Kazemian et al., 2011). Las turbas a diferencia de otros suelos orgánicos, poseen un contenido de materia orgánica superior al 75%. Este tipo de suelos está compuesto esencialmente por una acumulación de plantas en estado de descomposición, en la que su tasa de acumulación es más alta que su tasa de descomposición (Huat et al., 2014).

Las turbas, al ser suelos problemáticos al momento de realizar obras de infraestructura, preferiblemente se opta por evitarlos, ya sea construyendo en un lugar donde el suelo tenga mejores propiedades, reemplazando las turbas con suelos más adecuados, o empujando pilotes hasta encontrar un suelo más resistente (Kalantari et al., 2014). Sin embargo, aunque los edificios estén construidos sobre pilotes, el suelo blando alrededor aún puede asentarse, dando como resultado fallas en los pavimentos, en construcciones circundantes, entre otros; provocando pérdidas de dinero, energía y tiempo (Zulkifley et al., 2014). Por lo tanto, mejorar las propiedades del suelo es esencial antes de comenzar la construcción de obras sobre un suelo de turba.

Existen una variedad de métodos de estabilización de suelos dependiendo del tipo de suelo a mejorar. Para el caso de turbas, el reemplazo de suelo es eficaz si la capa de turba no es demasiado profunda, pues en caso de serlo, elevaría los costos de la operación (Huat et al., 2014). En caso de las precargas, esta opción requiere mucho tiempo si no se utilizan mechas drenantes. Los tratamientos con geosintéticos no abordan los problemas asociados con la construcción debido al alto contenido de agua y al potencial asentamiento a largo plazo de estos depósitos (Kazemian et al., 2011). La estabilización química con aditivos como el cemento y la cal, en comparación con los otros métodos, son la opción más económica y que ahorra tiempo, pudiéndose aplicar mediante el método de mezcla profunda in situ (columnas de cal-cemento) o como estabilizador superficial (Kazemian, 2017).

Se han realizado múltiples investigaciones acerca de cómo mejorar las propiedades geotécnicas de las turbas mezclándolas con distintos aditivos químicos como cemento, cal, yeso,

escoria de alto horno, humo de sílice, entre otros. Además, se han realizado estudios sobre la utilización de rellenos que pueda aportar una mayor resistencia a las turbas estabilizadas con algún aditivo. Múltiples estudios, como el de Hwang et al. (2004), han realizado estudios detallados sobre estabilización de suelos orgánicos en la que revelan al cemento como el aglutinante más efectivo para mejorar las propiedades de las turbas.

Dada la naturaleza de la turba, que está compuesta principalmente de restos vegetales, esta presenta propiedades geotécnicas propias y distintas en comparación con los suelos inorgánicos como los arcillosos y arenosos (Huat et al., 2014). Además, dada la complejidad de las propiedades químicas y físicas de la turba con materiales estabilizadores es tal que no es posible predecir para un sitio dado qué estabilizador y dosificación producirán un rendimiento óptimo (EuroSoilEstab, 2002).

Es así que las turbas presentan un problema adicional al momento de realizar estabilizaciones. Su alto contenido orgánico y cantidades insignificantes de partículas sólidas hacen que el cemento por sí solo en algunos casos no sea suficiente para proporcionar la resistencia de estabilización deseable en la mejora de la turba, a menos que se agregue cemento al suelo en cantidades grandes y antieconómicas (Zulkifley et al., 2014). Por tal motivo, se han realizado estudios acerca de estabilizar suelos altamente orgánicos con cemento como principal aglutinante y otros aditivos o rellenos adicionales.

Dehghanbanadaki et al. (2017) y Wang et al. (2020) mostraron que el uso de arena bien graduada (SW) y arena manufacturada, respectivamente, mejoraban las propiedades ingenieriles de las turbas tratadas con cemento. En otro estudio sobre el uso de otros aditivos o rellenos, Saberian y Rahgozar (2016) utilizaron astillas de llantas desechadas y arena en combinación con cemento para mejorar las propiedades geotécnicas de las turbas. Kalantari et al. (2008) utilizaron fibras de polipropileno para reforzar la turba estabilizada mostrando buenos resultados. Sin embargo, en cada estudio se analizó un tipo de turba diferente. Este tipo de suelo tiende a ser muy variable en cuanto a muchas de sus propiedades, pues estas son afectadas por el tipo de materia vegetal descompuesta, el clima, la profundidad, entre otros; por lo que requiere un estudio especial a cada tipo de turba a tratar.

Es así que la estabilización de suelos orgánicos y turbas con cemento varía dependiendo principalmente de las propiedades de la turba; así como el uso de algún tipo de aditivo, el uso de rellenos, la dosificación, la mezcla entre materiales, el tipo y tiempo de curado. Estas mejoras se verifican por ensayos de compresión no confinada, por ensayos de resistencia al corte, por consolidación, entre otros. Del mismo modo, la efectividad de la estabilización varía dependiendo del método de curado utilizado. Basado en estas premisas, esta investigación compara entre las distintas investigaciones experimentales realizadas por distintos autores enfocados en estabilizar suelos orgánicos con cemento, para así poder relacionar cuál o cuáles son los métodos más efectivos al momento de estabilizar un suelo orgánico o turba dependiendo de sus propiedades geotécnicas generales. Ello para dar una visión más amplia de por donde se podría empezar a analizar la

estabilización de un suelo de turba en el Perú.

1.2. Justificación

Actualmente no existe un mapa completo con las ubicaciones exactas de las zonas con turbas en el mundo, mucho menos en el Perú. Sin embargo, según recientes estudios, se estima que existen 120 000 km² de turbas en la Amazonía peruana de hasta 7.5 m de profundidad (Lähteenoja et al., 2011). Debido al incremento demográfico y económico, en algún momento será inevitable la construcción de algún tipo de infraestructura esencial sobre este tipo de suelos, ya sean viviendas, carreteras, colegios, entre otros. Es así que es esencial conocer métodos para poder construir sobre estos suelos sin la necesidad de utilizar pilotes para cimentar, o reemplazar el suelo, ya que estos métodos suelen ser muy costosos. Es por tal motivo que se han realizado múltiples investigaciones alrededor del mundo sobre cómo estabilizar suelos orgánicos o turbas con la ayuda de distintos aglutinantes, resultando de ellos el cemento portland de los más efectivos para dicho fin, además de que su uso con otros tipos de rellenos puede resultar aún mucho más efectivo, pues el contenido de los suelos orgánicos varía de un lugar a otro debido a variables como el tipo de vegetación, el grado de descomposición, humedad, temperatura.

1.3. Hipótesis

El cemento es un aditivo eficaz para estabilizar suelos orgánicos y turbas. Sin embargo, las turbas pueden presentar distintas propiedades dependiendo del origen de los restos de plantas, el clima, la humedad, la cantidad de materia orgánica y el grado de descomposición. Estos factores pueden afectar la efectividad de la estabilización (Huat et al., 2014). Por lo tanto, se debe tener en cuenta al momento de estabilizar suelos de turba con cemento.

Existen diferentes métodos para estabilizar un suelo de turba con cemento y la eficacia de estos dependerán de los factores antes mencionados y las diferentes técnicas y componentes extras a utilizar. Por ejemplo, el método y tiempo curado de las muestras estabilizadas en laboratorio afectan en la resistencia de las muestras, ya que estos métodos tratan de reflejar lo que sucede cuando se realiza la estabilización del suelo en campo. Así mismo, el uso de algunos aditivos y rellenos en conjunto con el cemento, pueden mejorar la eficacia de la estabilización, reduciendo así el uso de cemento en grandes cantidades y aportando mayor resistencia a las muestras de turba estabilizadas.

1.4. Objetivos

El objetivo general es comparar la eficacia de los diferentes métodos de estabilización de suelos de turba que tengan al cemento como principal aglutinante y relacionarlos con los tipos de turba existentes.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Describir las turbas y su clasificación, el problema geotécnico de estas y la relación turba-cemento.
- Analizar los métodos de curado y su influencia en la resistencia de muestras de turba estabilizada con cemento
- Comparar los distintos aditivos químicos y no químicos, y su efecto en la mejora de las propiedades de la turba. Así mismo, verificar cuál es el tipo de relleno más efectivo para mejorar las propiedades de la turba. Entre estos rellenos se encuentran a las arenas y gravas.
- Identificar los métodos más efectivos de estabilización de turbas con cemento como principal estabilizador y relacionar su uso con los distintos tipos de turbas existentes.



2. Metodología

El propósito sobre la que se centra esta tesis es el de realizar una investigación documental acerca de suelos altamente orgánicos como la turba, así como métodos de estabilización de este tipo de suelos. Para la realización de este propósito, se ha basado fundamentalmente en la revisión de libros, publicaciones académicas, manuales, entre otros.

Para obtener una información variada y fiable, en primer lugar, se realizó una búsqueda sistemática de información bibliográfica en bases de datos en centros de documentación especializados, como Elsevier, Springer, Scopus, Science Magazine. Esto permitió una búsqueda selectiva y de forma paralela en múltiples bases de datos; además, el rastreo bibliográfico se realizó a partir del año 2000, a fin de obtener información actualizada.

En segundo lugar, se realizó una búsqueda derivada. Es decir, una vez localizados los estudios de interés para la investigación (artículos, libros, tesis, etc.), se localizaron nuevas referencias bibliográficas mediante las bibliografías adjuntas de los documentos consultados. Esto permitió localizar material importante que no había sido localizada con el sistema de búsqueda anterior. A su vez, esta estrategia permitió identificar los documentos más citados por los diversos autores, permitiendo así validar la confiabilidad de múltiples investigaciones.

La información recopilada de estudios experimentales sobre la estabilización de suelos de turbas con cemento como principal aditivo, se utilizarán con el principal objetivo de comparar los métodos más eficaces para estabilizar suelos de turba en función al tipo de turba estabilizada. Si bien las propiedades de las turbas varían dependiendo de lugar de origen de los restos vegetales, se tomará principalmente en cuenta la clasificación hecha por Von Post (1922) en “Sveriges geologiska undersoknings torvinventering och nagre av dess hittills vunna resultat”, en el cual clasifica a la turba según su grado de descomposición que van desde H_1 (Fibroso y sin descomponer) a H_{10} (amorfo y descompuesto), y la clasificación de la American Society for Testing and Materials (ASTM - D4427), que divide a las turbas en tres grupos (fibrosa, hémico y sáprico).

La fuente primaria de esta tesis es el libro *Geotechnics of Organic Soils and Peat* (Huat et al., 2014). En este libro se describen los diferentes tipos de turbas, así como una visión general de los métodos de estabilización de suelos orgánicos. Las fuentes secundarias se encuentran en la sección de Bibliografía, de las cuales se ha recopilado teoría acerca de la estabilización química y sobre los métodos más eficientes para estabilizar suelos de turba. En estas también se encuentran las diferentes dificultades acerca de estabilizar suelos de turba con cemento.

De esta manera, se analizarán la influencia del método de curado utilizado en las muestras estabilizadas, ya que estos tratan de reflejar las condiciones en campo. Del mismo modo, se analizarán los distintos aditivos químicos, aditivos no reactivos y rellenos, y su influencia en la mejora de suelos de turba estabilizados con cemento.

La toma de datos numéricos en los gráficos realizados por los diferentes estudios, se

recopilarán con el programa GetData Graph Digitizer 2.26.

Al finalizar, se recopilarán los métodos más eficientes para estabilizar suelos de turba según su tipo, con el fin de relacionar el método más efectivo y así brindar alternativas eficientes para la estabilización química de turbas.



3. Marco teórico

3.1. Suelos orgánicos y turbas

3.1.1. Definición

Los suelos orgánicos y turbas son suelos extremadamente blandos y húmedos que poseen una gran cantidad de materia orgánica, producto de plantas en descomposición, cuya tasa de acumulación es mucho más alta que su tasa de descomposición. Esta acumulación se da en condiciones adecuadas, donde la aireación es incompleta y el nivel freático se encuentra por encima de la materia orgánica. La turba suele tener un color marrón oscuro o negro, además de tener un olor característico a descomposición, a diferencia de los suelos minerales. En algunas turbas se puede observar restos de fibras de plantas, lo que hace que su identificación sea más clara, pero, en etapas avanzadas de descomposición, las fibras pueden no ser evidentes. Dado al alto contenido de materia orgánica, la turba es esponjosa, altamente compresible y combustible (Huat et al., 2014).

Se considera que un suelo es orgánico cuando el contenido de materia orgánica supera el 20% de su masa seca; y se denominan turbas cuando este contenido excede el 75% (Huat et al., 2014). Las turbas son extremadamente sueltas, húmeda y no consolidada. Además, el acceso a depósitos de turba suele ser muy difícil, ya que el nivel freático existe cerca o por encima de la superficie del suelo.

3.1.2. Clasificación

Comúnmente los suelos orgánicos se clasifican por su contenido orgánico, contenido de fibras y contenido de otros materiales. El contenido de la turba varía dependiendo de las condiciones del lugar, como la temperatura, la aireación, el suministro de agua, el tipo de vegetación, entre otros. El grado de descomposición de la turba varía a lo largo de su profundidad, ya que, dependiendo del tipo de vegetación, esta puede tardar mucho más en descomponerse.

Es por tal que la clasificación de turbas varía entre la disciplina de la ciencia y la ingeniería geotécnica, así como entre países (Huat et al., 2014). Para la ingeniería geotécnica, la definición de suelos orgánicos se basa en las propiedades mecánicas del suelo. Si un suelo contiene un contenido orgánico superior al 20%, los criterios utilizados para analizar arcillas o limos ya no pueden aplicarse de igual forma (Huat et al., 2014). Es así que los suelos orgánicos y turbas deben ser bien identificados y estudiados.

Distintos autores y entidades del mundo han buscado clasificar a las turbas. Von Post (1922) clasificó a las turbas por su contenido de fibras y grado de descomposición en diez categorías, desde turbas en las que es posible aún la identificación de plantas (H_1) hasta turbas en que las plantas están totalmente descompuestas y no es posible identificar ningún resto vegetal (H_{10}). Esta clasificación se puede ver completa en el Anexo A, y en la Tabla 3.1 una adaptación de esta realizada por Huat et al.

(2014), en el cual relacionan la clasificación de von Post (1922) y la clasificación realizada por la ASTM-D4427.

Tabla 3.1: Términos y símbolos de calificación para Turbas (Huat et al., 2014).

Orgánico	Escala de von Post	Calificación	Símbolo del componente
Turba			Pt
	H ₁ -H ₄	Fibroso	f
	H ₅ -H ₇	Hémico/ moderadamente descompuesto	h
	H ₈ -H ₁₀	Sáprico / amorfo	a

La clasificación de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM - D4427) se muestra en la Tabla 3.2, en la que indican que se consideran turbas si los suelos tienen un contenido orgánico de más del 75%.

Tabla 3.2: Rangos de contenido orgánico (ASTM D4427) (Huat et al., 2014).

Tipo de suelo	Descripción	Contenido orgánico (%)
Arcilla o limo o arena	Ligeramente orgánico	2-20
Suelo orgánico	-	25-75
Turba	-	>75

Del mismo modo, la ASTM (1990) clasifica a las turbas en tres grupos según su contenido de fibras: a) fibrosa (fibrosa, menos descompuesta, más de 67% contenido de fibra, extremadamente ácido), b) hémica (semifibrosa, descomposición intermedia) y c) sáprica (amorfa, casi descompuesta, menos de 33% contenido de fibra, baja capacidad de retención de agua).

3.1.3. Propiedades ingenieriles

La turba es difícil de muestrear (von Post, 1992; Huat, 2004). La presencia de fibras, la anisotropía inherente, la tendencia a una alta compresibilidad y un drenaje rápido, y la baja y muy variable resistencia de estos materiales hacen inviable el uso de pruebas de campo convencionales y la interpretación de parámetros mecánicos (Huat et al., 2014). No hay herramientas especiales para poder extraer muestras de suelo orgánico inalterado. Los métodos que se utilizan son modificaciones de herramientas utilizadas para tomar muestras de suelos inorgánicos. Kalantari y Prasad (2014) utilizaron un muestreador desarrollado por Duraisamy et al. (2009, 2007). Este muestreador se muestra en la Figura 3.1.

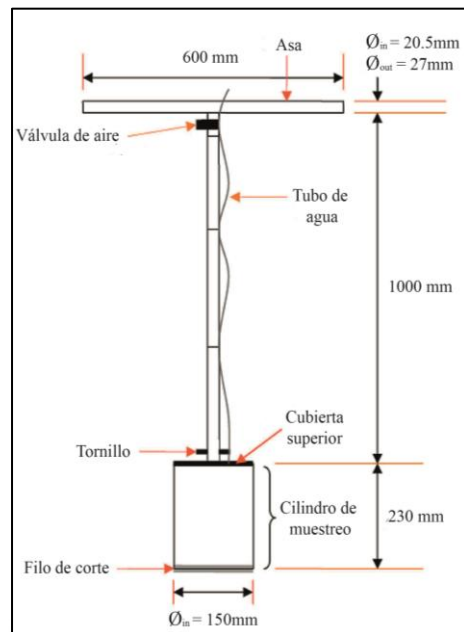


Figura 3.1: Muestreador de turbas (Traducido de Kalantari et al., 2014).

A pesar de que la turba es difícil de muestrear, es posible estudiar sus propiedades ingenieriles que son útiles para describir un suelo de turba.

- **Contenido de agua** de las turbas es muy alto en comparación con los suelos minerales. Estos valores pueden variar entre 500% y 2000%, aunque algunas turbas con alto contenido de fibras llegan a tener 2500%. Valores de contenido de agua menos de 500% es un indicador usual de que la turba tiene gran cantidad de minerales (Huat et al., 2014).
- La **gravedad específica** oscila entre 1.4 y 1.8 (Huat et al., 2014).
- La **relación de vacíos** usualmente se encuentra en los rangos de 7 y 25 (Huat et al., 2014).
- La **permeabilidad** varía por otros factores además del tipo de turba. Al ser un suelo bastante compresible, si este se somete a una carga, la permeabilidad disminuye. Sin embargo, la turba in situ tiene una permeabilidad que varía entre 10^{-2} y 10^{-5} cm/s (Huat et al., 2014).
- Valores bajos de **pH** < 4.8 suelen caracterizar turbas fibrosas, mientras que para las turbas hémicas y sápricas, el **pH** es bastante neutro y varía entre 4.8 y 6.4 aproximadamente. Sin embargo, el rango de acidez de la turba es muy amplio, por lo que el valor de pH de la mayoría de las turbas varía de 2 a 7 (Kazemian et al., 2011)

3.2. Ensayos químicos

Los ensayos químicos sobre las turbas se realizan según distintas normas para poder obtener las propiedades importantes en suelos, como los antes mencionados. Entre las normas principales se encuentran Standard Test Method for Laboratory Determination of the Fiber Content of Peat Samples by Dry Mass (ASTM D1997 – 91 (2008)) y Standard Test Methods for Determining the Water (Moisture) Content, Ash Content, and Organic Material of Peat and Other Organic Soils (ASTM D2974 – 20e1).

3.3. Problemas con turbas

3.3.1. Compresibilidad de la turba

En los suelos suelen distinguirse 3 tipos de asentamientos: asentamiento instantáneo, consolidación primaria y asentamiento secundario. El primero ocurre instantáneamente después de que se aplica la carga, mientras que el asentamiento por consolidación y asentamiento secundario dependen del tiempo que se aplica la carga. En la turba, el asentamiento instantáneo ocurre debido a la compresión del gas dentro de los espacios porosos de la turba y a la compresión elástica de los granos del suelo. La consolidación primaria aumenta el esfuerzo vertical efectivo y provoca la disipación del exceso de presión de presión de poros de agua. Una vez completada la disipación del exceso de presión de agua intersticial, la compresión secundaria tendría lugar con un esfuerzo vertical efectiva constante (Kazemian et al., 2011). Comparado con los suelos minerales, la turba es altamente orgánica y altamente compresible. Por tal motivo la consolidación primaria de la turba fibrosa se produce rápidamente, incluso con cargas bajas (Figura 3.2).

Los factores que controlan las características de compresibilidad en la turba son el contenido de fibra, el contenido de agua, la relación de vacíos, la permeabilidad, la naturaleza y disposición de las partículas del suelo y la unión química entre partículas en algunos de los suelos (Huat et al., 2014). La determinación de la compresibilidad de la turba fibrosa se basa generalmente en el ensayo de consolidación estándar (Kazemian et al., 2011). El diagrama $e\text{-log}\sigma'$ de las turbas muestra una pendiente pronunciada que indica un valor alto del índice de compresión (C_c) que varía de 2 a 15 (Kazemian et al., 2011).



Figura 3.2: Asentamiento a largo plazo de un edificio de bajo peso construido sobre turba de Poncia (Dehghanbanadak et al., 2016).

3.3.2. Resistencia al corte de la turba

La resistencia al corte es un parámetro importante en el diseño cuando se trata de suelos, ya que se utiliza para evaluar la estabilidad de los cimientos y pendientes del suelo. Cuando se excede la resistencia máxima de corte, el suelo fallará y se deformará. La magnitud de la deformación de los

suelos depende de la carga aplicada, el tipo de suelo, el historial de esfuerzos del suelo, así como la relación de vacíos y también de la forma en que se aplica el esfuerzo (Huat et al., 2014).

Como se mencionó, la turba es muy difícil de muestrear y se necesitan equipos especiales para poder recolectar muestras, por lo que las pruebas de laboratorio solo dan resultados indicativos pues la naturaleza de la turba es variable. La turba es un suelo que tiene una resistencia al cizallamiento muy baja, y su determinación dependen del origen de la turba, del contenido de agua, el contenido de fibras, el grado de descomposición y el contenido de minerales. Según Munro (2005), a mayor contenido de humedad y descomposición, menor es la resistencia al cizallamiento; además, el mayor contenido de minerales provoca una mayor resistencia al corte.

Uno de los factores más importantes a considerar cuando se analiza la resistencia al corte de la turba es el contenido de fibra, pues la presencia de fibras modifica el comportamiento de resistencia de la turba, ya que estas pueden actuar como refuerzo dependiendo de su posición en la turba y proporcionar un esfuerzo efectiva donde no la hay, lo que hace a la turba fibrosa un material anisotrópico. Es así que un alto ángulo de fricción de la turba puede no reflejar una alta resistencia al cizallamiento.

3.3.3. Problemas desde el punto de la ingeniería geotécnica

A diferencia de los suelos minerales blandos, la turba presenta características geotécnicas inferiores a estos. Estas características hacen que la turba requiera consideraciones especiales al momento de planificar la construcción sobre ellas. Las turbas al contener una gran cantidad de materia orgánica, estas presentan características de baja resistencia, gran deformación, alta compresibilidad, potencial de descomposición adicional y alta permeabilidad.

Es así que la turba está sujeta a problemas de inestabilidad y asentamientos primarios masivos y a largo plazo cuando se somete a aumentos de carga durante el trabajo de construcción. Además, genera dificultades al momento del muestreo para las pruebas de laboratorio, ya que recolectar muestras inalteradas es sumamente difícil. También, existe posibilidad de cambios químicos y biológicos en estos materiales con el tiempo (Kazemian et al., 2011).

Una solución bastante común es el uso de pilotes para las construcciones sobre turba. Sin embargo, el suelo alrededor aún puede asentarse, dando como resultado fallas en pavimentos, grietas en construcciones alrededor. Debido a estos problemas que ocasiona la turba, los ingenieros optan por evitar construir sobre este tipo de suelo. Sin embargo, en lugares donde es necesario la construcción de algún tipo de infraestructura sobre la turba, como carreteras, es importante conocer métodos de mejora de suelos orgánicos, considerando la sostenibilidad del proyecto.

3.4. Mejora de suelos

Los tratamientos de suelos juegan un papel vital en la ingeniería civil, pues es la única forma de estabilizar y mejorar las propiedades de los suelos. Todos los métodos de tratamientos de suelos

tienen como principal objetivo obtener resultados que satisfagan las necesidades de un proyecto en específico. Entre estos objetivos, los principales son hacer que los suelos tratados resistan las cargas transmitidas, obtener asientos admisibles, acelerar asientos por consolidación, mitigar riesgos de licuefacción, reducir la permeabilidad y el más importante: reducir costos.

Existen múltiples métodos de tratamientos de suelo, los cuales se aplican según las condiciones del suelo, el tipo de proyecto a realizar y disponibilidad de las herramientas necesarios para el tratamiento. Estos son algunos de los métodos de mejora de suelos que presentan problemas geotécnicos. Los métodos relacionados a mejorar turbas se discutirán a detalle en la siguiente sección.

- Precarga: Consiste en someter el terreno a un esfuerzo superior en la que se transmite la estructura que se va a cimentar, antes de su construcción. Toma un determinado tiempo, pero se puede acelerar con el uso de mechas drenantes, como se ve en la Figura 3.3. Provoca que los asientos tengan lugar antes de la construcción de la estructura. Acelera la consolidación y produce una compactación del terreno, por lo que aumenta su densidad y capacidad portante.
- Mezcla profunda *in situ* (columnas de cal-cemento): Se estabiliza el terreno con un material aglomerante (cal, cemento, bentonita) que da lugar a una serie de columnas de material mejorado tipo suelo-cemento. El terreno estabilizado posee una mayor resistencia, menor permeabilidad y menor compresibilidad que el terreno original
- Columnas de grava: Se utiliza grava compactada para rellenar los agujeros de agua en terrenos blandos.
- Pilotes: Esta solución resulta más costosa pues empuja pilotes de concreto armado a través de suelo malo hasta uno con mejores propiedades.
- Muelles de precarga: Método que aún está en desarrollo; consiste en un empaquetado de piedras en capas densas en un agujero para permitir la compresión radial del suelo.
- Reducción de las fuerzas impulsoras mediante el uso de relleno liviano: Se utilizan como relleno materiales ligeros pero suficientemente fuertes y rígidos como astillas de madera, astillas de llantas, *geofoam* o lutita expandida.

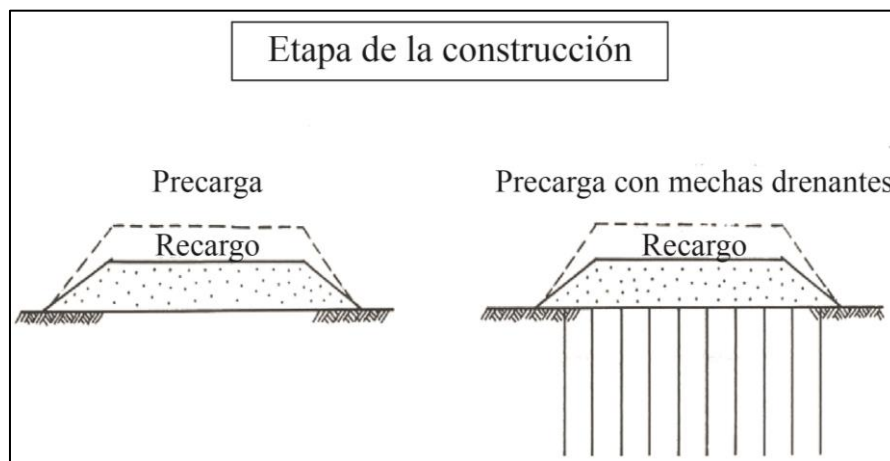


Figura 3.3: Precarga y drenaje vertical (Traducido de Huat et al., 2014).

3.4.1. Métodos de mejora de suelo para turbas

La turba para poder ser estabilizada requiere múltiples investigaciones in situ y en laboratorio, pues es un suelo que puede cambiar química y biológicamente en el tiempo. Además, dado que la turba es un suelo extremadamente blando, cuyas propiedades de baja resistencia al corte, baja capacidad de carga y alta compresibilidad, las características principales a mejorar son el peso específico y la resistencia al corte, reducción de la compresibilidad, la reducción de la permeabilidad para reducir el tiempo de consolidación.

Es así que algunos métodos de tratamientos de suelos blandos han sido adaptados para poder ser utilizados en suelos tan problemáticos como lo son las turbas. En esta sección se hablará sobre algunos métodos de tratamientos para mejorar suelos de turba y sobre sus posibles complicaciones en algunos casos.

- Reemplazo del suelo: Consiste en excavar el suelo inadecuado (turba) y reemplazarlo por materiales de relleno adecuados. Es un método eficiente y resulta económico si el espesor de las capas a reemplazar es de poca profundidad (2-3m), y si se tiene una fuente de relleno adecuado y dentro de una distancia de acarreo aceptable. Sin embargo, este método tiene varias limitaciones, pues si el espesor de la capa a reemplazar es muy grande, el método resulta ineficaz e inviable económicamente (Skels et al., 2013; Kalantari et al., 2014; Saberian et al., 2016).
- Precarga: Este método se aplica como se explicó en la Sección 2.2.1. (ver Figura 3.3). Sin embargo, los cálculos para hallar las tasas de asentamientos son difíciles de obtener, ya que la turba tiene compresiones secundarias muy grandes, y la relación tiempo-asentamiento no es de la forma característica, lo que dificulta diferenciar el asentamiento primario del secundario (den Haan y El Amir, 1994).
- El uso de geosintéticos también puede usarse para aumentar la estabilidad de las estructuras construidas sobre depósitos de turba, sin embargo, este método no aborda los problemas asociados con la construcción debido al alto contenido de agua y potencial de asentamiento a largo plazo de la turba (Kazemian et al., 2011).

▪ **Estabilización química:** La estabilización química consiste en realizar una mezcla del suelo a estabilizar con aditivos como la cal y cemento. Este método se puede aplicar mediante dos métodos conocidos: estabilización profunda in situ (columnas de cal-cemento) y estabilización de todo el volumen del suelo (estabilización de masa). A diferencia del método de mezcla profunda in situ, la estabilización en masa da como resultado un “bloque” de suelo estabilizado. Estos dos métodos también se pueden aplicar en conjunto dependiendo de las condiciones del suelo, en la Figura 3.4 se presenta como funcionan estos dos tipos de estabilización.

En comparación con otros métodos, los aditivos químicos son una opción más económica y que ahorra tiempo (Kazemian et al., 2011). Distintos autores, los cuales mencionaremos en los siguientes capítulos, realizaron estudios acerca de cuál aglutinante químico es el más efectivo para estabilizar turbas, en los cuales se llega a la conclusión de que el cemento es el que mejor actúa con la turba, a comparación de la cal que es la que peor se comporta. Rahmi et al. (2018), consideran la estabilización química con cemento un método eficaz para estabilizar turbas, especialmente para turbas profundas que puede alcanzar hasta 10 metros de profundidad.

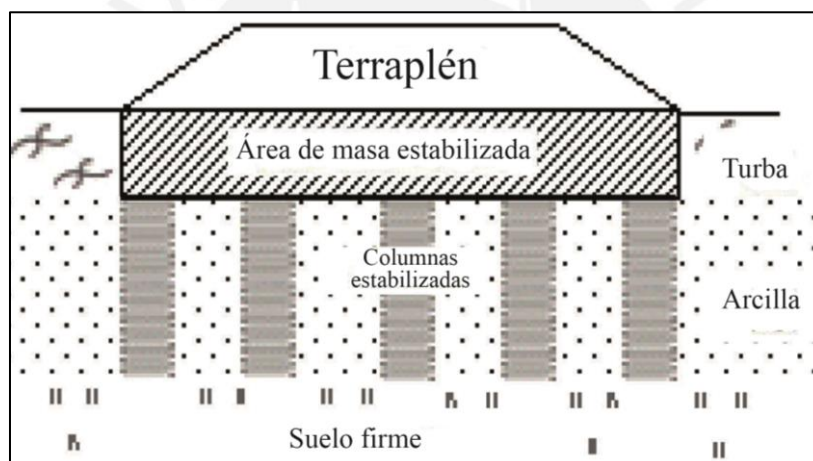


Figura 3.4: Combinación de estabilización de masa y columna (Traducido de EuroSoilStab, 2002).

3.4.2. Estabilización suelo-cemento

El cemento es un material que se fabrica combinando clínker de cemento con yeso. El clínker se forma tras calcinar caliza y arcilla, generando una serie de minerales que se presenta en la Tabla 3.3. El cemento tiene dos reacciones importantes: una reacción de hidratación entre el cemento y el agua y una reacción puzolánica entre el cemento y los minerales del suelo.

Tabla 3.3: Minerales de clínker que actúan como compuestos principales que mejoran la resistencia del cemento Portland ordinario (Janz y Johansson, 2002).

Nombre	Formula química	Abreviación
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Ferrita de aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF

La reacción de hidratación ocurre cuando el agua de los poros o el agua subterránea en el suelo interactúa con el cemento Portland ordinario para formar productos de cementación primaria que incluyen silicatos de calcio hidratado ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_4$), etringita ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_32$), monosulfato ($\text{C}_4\text{ASH}_{12}$) y cal hidratada (CH) (Janz y Johansson, 2002). Durante la hidratación se genera un gel de cemento conocido como gel CSH ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), que es el silicato de calcio hidratado. Este gel se forma en las superficies de las partículas de cemento y debido a que tiene un fuerte efecto cementante, une el suelo y aumenta su resistencia (Axelsson et al., 2002). Si el aglutinante es insuficiente o no está bien disperso en el suelo a estabilizar, o no hay una alta relación de agua-cemento, las partículas de cemento pueden estar muy dispersas, dando como resultado una alta porosidad y una baja resistencia al suelo estabilizado, sin embargo, una alta relación agua-cemento también puede llevar a una alta porosidad y por consiguiente a una baja resistencia de la pasta de suelo-cemento endurecida (Zulkifley et al., 2014).

En reacciones puzolánicas, también se forman silicato de calcio hidratado (CSH: $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) y aluminato de calcio hidratado (CAH: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), compuestos que luego se cristalizan aumentando la resistencia del suelo. Sin embargo, estas reacciones puzolánicas son en menor cantidad a comparación de otros aditivos, como la cal.

3.4.3. Estabilización de turba con cemento

Existen múltiples factores a tomar en cuenta al momento de estabilizar un suelo altamente orgánico con cemento. Los factores que afectan a la estabilización de turbas con cemento son: el contenido de agua; propiedades físicas, químicas y mineralógicas; naturaleza y cantidad de contenido orgánico y el pH del agua de los poros. El grado de descomposición también puede afectar el desarrollo de la fuerza.

El cemento forma materiales aglutinantes con el agua de la turba, reduciendo así el contenido de agua de este; además también produce reacciones puzolánicas con las partículas de arcilla presentes en la turba. Sin embargo, estas reacciones no son tan predominantes en la turba debido a que la turba presenta poco material particulado y el cemento produce pocas reacciones puzolánicas a comparación de la cal.

La turba tiene un contenido relativamente bajo de puzolanas que pueden entrar en reacciones secundarias de cementación. La reacción puzolánica secundaria de la turba estabilizada con cemento

se retarda debido a la insuficiencia de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) que pueden reaccionar con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) generado a partir de la hidratación del cemento para formar silicatos de calcio secundarios, que son responsables de la ganancia de resistencia a largo plazo del suelo de turba estabilizado (Kalantari et al., 2011). Es así que autores como Skels et al. (2013) sugirieron que, para aumentar significativamente la resistencia de la turba estabilizada con cemento, se debe agregar grandes dosis de cemento.

La materia orgánica también puede incluir sustancias retardantes como humus y ácidos húmicos. Durante la estabilización, los ácidos húmicos reaccionan con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para formar ácido húmico de calcio insoluble, retardando la cristalización del calcio, lo que impide el aumento de la resistencia de la mezcla suelo-cemento de turba (Chen y Wang, 2006; Kalantari et al., 2011; Zulkifley et al. 2014). Los ácidos también pueden hacer que baje el pH del suelo (Axelsson et al., 2002). Es decir, los valores bajos de pH afectarán negativamente la velocidad de reacción del cemento, dando como resultado una ganancia de resistencia lenta. Para que una estabilización de suelos orgánicos sea efectiva, el pH del suelo estabilizado debe exceder a 9 (Tremblay et al., 2002; ASTM D4609).

Axelsson et al. (2002) indicaron que, en suelos con un alto contenido orgánico, como la turba, la cantidad de aglomerante debe superar un “umbral”, pues si la cantidad de aglutinante está por debajo de este, el suelo permanecerá sin estabilizar; además Axelsson et al. (2002) sostienen que una razón de esto puede ser que los ácidos húmicos se neutralizan cuando se agrega suficiente aglutinante, como se muestra en la Figura 3.5.

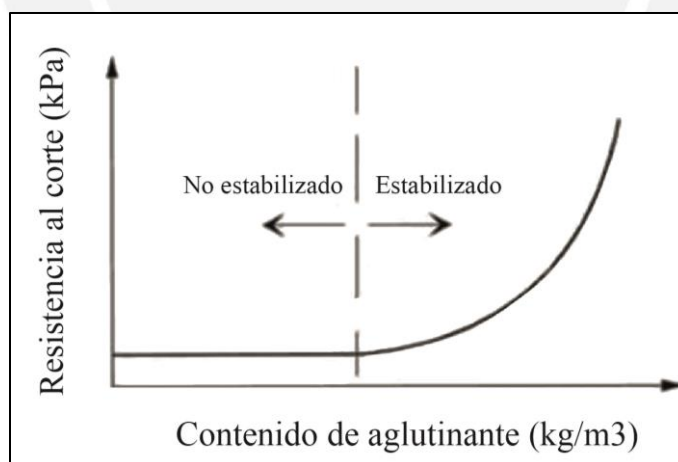


Figura 3.5: Relación general entre la dosis de aglutinante y la resistencia al corte en suelos de turba (Traducido de Dehghanbanadaki et al., 2013).

Por lo tanto, Zulkifley et al. (2014) afirman que a menudo no se puede lograr una ganancia significativa de resistencia con el uso de aglomerante de cemento solo en la estabilización de turba, a menos que se agregue cemento al suelo en cantidades grande y antieconómicas, por lo que se puede optar por el uso de aditivos y rellenos para mejorar la resistencia de la turba estabilizada con cemento. De esto se tratará en capítulos siguientes.

4. Efecto de técnicas de curado sobre la resistencia de la turba estabilizada

Gran parte de los estudios realizados sobre suelos de turba se centran en hallar la cantidad adecuada de aglutinante que necesita un suelo de turba para poder mejorar sus propiedades, así como agregar diferentes rellenos o aditivos para que el tratamiento del terreno sea más efectivo. Sin embargo, los estudios de turba estabilizada con aglutinantes y curado por diferentes métodos para evaluar los efectos de curado son escasos (Kalantari y Prasad, 2014).

Los métodos de curado consisten en tratar de reflejar lo que se aplica en campo a un laboratorio. Por lo tanto, es importante aclarar que existe una diferencia entre la estabilización en laboratorio y la estabilización *in situ*. La resistencia de una muestra de suelo estabilizado en laboratorio suele ser significativamente más alta que la resistencia de un material estabilizado en campo (EuroSoilStab, 2002). La diferencia radica en las condiciones que ofrece un laboratorio, donde la mezcla de suelo y aglutinante es más eficiente comparado en campo; además las condiciones en un laboratorio son estables, en comparación a los distintos cambios climáticos en los que se encuentra la turba en su estado natural.

La prueba más común para medir la resistencia de un suelo de turba estabilizado con cemento es la prueba de compresión no confinada, por sus siglas en inglés UCS (Unconfined Compression Strength). De acuerdo con ASTM D4609 (guía estándar para evaluar la efectividad de la mezcla para la estabilización del suelo), la estabilización del suelo es efectiva si el UCS resultante es de al menos 345 kPa (Sariosseiri & Muhunthan 2009).

Otros ensayos comunes que se aplican a las muestras estabilizadas son los ensayos de consolidación, ensayos de corte directo, ensayos de permeabilidad, entre otros.

Es así que este capítulo describe diversos estudios sobre los efectos de distintos métodos de curado adoptadas en la estabilización de turba con cemento.

4.1. Métodos de curado en la estabilización de turbas

Las muestras que se ponen a curar son el producto de una mezcla de turba cuidadosamente tratada con cemento. Las dimensiones de las muestras a curar, varían dependiendo de los ensayos a realizar y las normas BS y US (ASTM). Los métodos de curado a mencionar, son métodos para muestras que serán ensayadas en pruebas de compresión no confinada.

4.1.1. Curado en aire

El curado en aire consiste en exponer la mezcla de turba con cemento al aire para curar, sin el contacto de agua externa en la mezcla. Esta técnica de curado se aplica ya que las turbas tienen un contenido de agua natural muy alto, ayudando en la hidratación del concreto. El cemento completamente hidratado absorbe aproximadamente el 20% de su propio peso de agua del entorno (Kalantari y Prasad, 2014). Un contenido de humedad insuficiente hará que el cemento compita con el suelo para obtener las cantidades de humedad necesaria, haciendo que el proceso de hidratación

se retrase, lo que afectaría su resistencia final (Axelsson et al., 2002; Kalantari y Prasad, 2014).

Este método refleja un proceso de estabilización *in situ*, ya que el proceso de estabilización normalmente comienza con la reducción del nivel freático, mezclando el suelo de turba con aglutinantes, curando al aire el suelo durante un periodo de tiempo determinado y devolviendo el nivel freático al nivel original (Kalantari et al., 2011).

Kalantari y Prasad (2014) después de haber preparado las muestras, envolvieron las muestras en una fina lámina de plástico dejando expuesta la parte superior para permitir el movimiento de la humedad solo desde la parte superior y no desde los lados para representar de cerca la condición *in situ* (Figura 4.1).

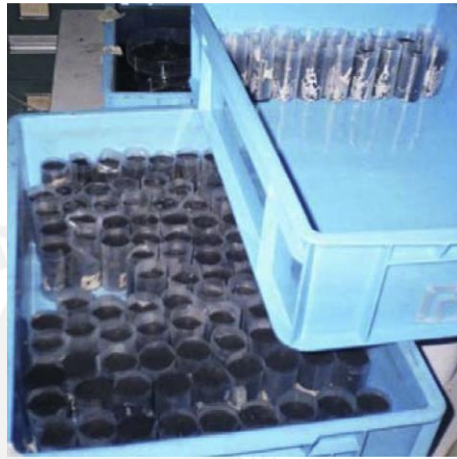


Figura 4.1: Muestras durante etapa de curado en aire (Kalantari y Prasad, 2014).

4.1.2. Curado húmedo

Las muestras de curado húmedo se colocan en tubos de polietileno y se mantienen sumergidas en agua durante todo el periodo de curado (Figura 4.2), para asemejar un nivel freático alto de la turba en condiciones de campo cuando no se ha hecho la reducción de nivel freático si se ha aplicado otra condición. El periodo de curado varía según los estudios para visualizar el mejoramiento de la turba estabilizada. Estos van de 7, 28, 90 y 180 días.



Figura 4.2: Muestras durante etapa de curado húmedo (Kalantari y Prasad, 2014).

4.1.3. Curado húmedo con sobrecarga

El curado húmedo con sobrecarga consiste en sumergir las muestras estabilizadas con cemento y aplicar una carga sobre ellas durante todo el periodo de curado (Figura 4.3). El periodo de curado va de los 7, 28, 90 y 180 días según los estudios realizados.

Este proceso de curado se realiza debido a que existe una ventaja al aplicar cargas, pues esta mejora la calidad del suelo tratado químicamente al exprimir las burbujas de aire que puede haberse introducido durante el proceso de la mezcla (Hwang et al., 2004). Otra razón por la que se utiliza este proceso es debido a que después de haber realizado la estabilización in situ, generalmente se colocan arenas sobre las columnas de suelo estabilizado (Skels et al., 2013)



Figura 4.3: Muestras durante etapa de curado húmedo con sobrecarga (Kalantari y Prasad, 2014).

4.2. Influencia de los métodos de curado sobre la resistencia de la turba estabilizada con cemento

Kalantari y Prasad (2014) realizaron un estudio experimental sobre los efectos de los métodos de curado sobre la resistencia de una turba estabilizada con cemento. Para dicho fin recolectó muestras de turba perturbada y no perturbada de Kampung Jawa en Malasia peninsular. Las propiedades de dicha turba se encuentran en la Tabla 4.1. Las muestras de turba se estabilizaron con 3 dosis diferentes de cemento Portland ordinario (OPC por sus siglas en inglés): 15%, 30% y 50%

(por ejemplo, 15% de media, 15 g de OPC mezclado con 100 g de turba con un contenido de humedad natural del 417%); y se curaron mediante los 3 métodos de curado mencionados: curado al aire, curado húmedo, y curado húmedo con sobrecarga de 10kPa, que equivale a 0.6m de arena. La resistencia de las muestras estabilizadas las determinó mediante la prueba UCS.

Tabla 4.1: Propiedades de turba de Kampung Jawa, Malasia (Adaptado de Kalantari y Prasad, 2014).

Propiedades	Norma	Valores
Contenido de humedad (%)	ASTM D2216	417%
Clasificación	Von Post	H ₁ -H ₄
pH	BS 1377	6.4
Contenido orgánico (%)	ASTM D2974	80.23
Contenido de fibras (%)	ASTM, 1997-91	43
Índice de compresión (Cc)	BS 1377	3.64
UCS sin alterar (kPa)	ASTM D2166	28
CBR sin alterar	ASTM D1883-73 AASHTO T193-63	0.78%

Una adaptación de los datos recopilados del autor se puede ver en la Figura 4.4. En los gráficos se puede observar que para las muestras con 15% de cemento (Figura 4.4.a), el curado en aire fue el más efectivo alcanzando una resistencia máxima de 295 kPa a los 180 días de curado, y los valores más bajos se dieron para los otros dos métodos de curado, aumentado solo a 39 kPa y 58 kPa para un curado húmedo y curado húmedo con sobrecarga respectivamente. Cabe resaltar que las muestras de turba sin estabilizar ensayadas a compresión no confinada resultaron solo en 28 kPa de resistencia, como se puede ver en la Tabla 4.1.

Para el caso de las muestras con un 30% de cemento (Figura 4.4.b), el método menos efectivo es el curado húmedo, alcanzado como máximo 176 kPa a los 180 días de curado. Además, para esta dosificación de cemento, vemos que el método más efectivo sigue siendo el curado en aire, pues a los 90 días de curado alcanza la misma resistencia que el curado húmedo con sobrecarga. Esta relación no se repite cuando la dosificación es de 50% de cemento, en la que el método más efectivo y la que alcanza el máximo valor entre todas las dosificaciones es el curado húmedo con sobrecarga, siendo este 1100 kPa.

Con la técnica de curado en aire los valores más altos se alcanzan con 50% de cemento, sin embargo, las muestras con 30% de cemento arrojaron valores cercanos al de 50%, por lo que se podría decir que para este método la opción más económica es de 30% de cemento (Kalantari y Prasad, 2014). La técnica de curado húmedo arrojó los valores más bajos de UCS independientemente del contenido de cemento o los periodos de curado. En comparación con las muestras de curado húmedo con sobrecarga, los valores más altos se obtuvieron con 50% de cemento.

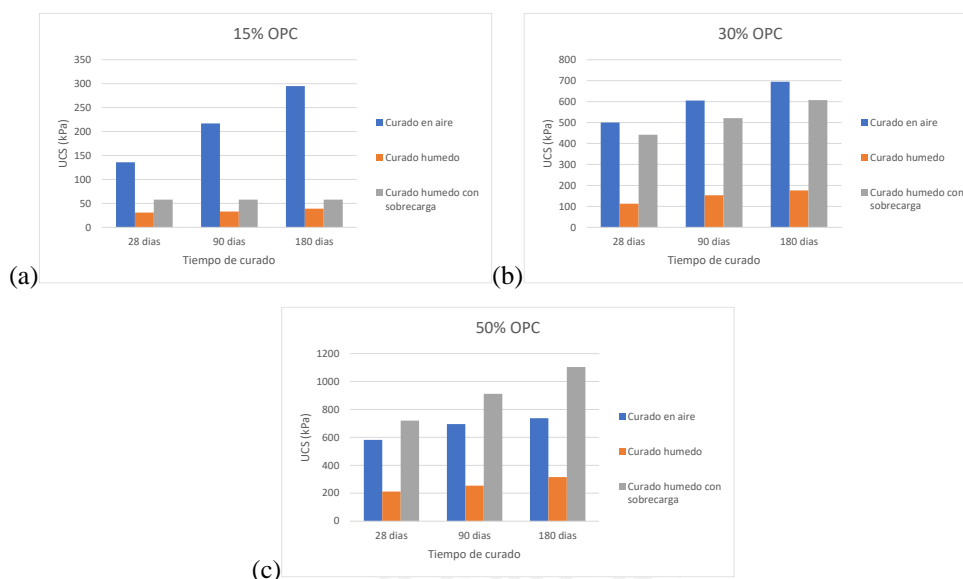


Figura 4.4: UCS de muestras curado: a) 15% OPC; b) 30% de OPC; c) 50% de OPC (Adaptado de Kalantari y Prasad, 2014).

Por otro lado, Dehghanbanadaki et al. (2016) realizó un estudio que tuvo como uno de sus objetivos el de determinar la cantidad óptima de aglutinantes y los efectos de las técnicas de curado sobre los parámetros de consolidación. Para tal propósito utilizaron pruebas de consolidómetro de deformación grande (celda de Rowe) para evaluar los parámetros de compresibilidad de la turba estabilizada con diferentes cantidades de aglutinantes. Las muestras de turba extraídas alteradas e inalteradas fueron de Poncia, Malasia. Las principales propiedades de este suelo se pueden observar en la Tabla 4.2. Todas las muestras las sometieron a presiones de consolidación de gran deformación de 25, 50, 100, 200 y 400 kPa utilizando drenaje vertical de dos vías, en la que cada presión se mantuvo constante durante 24 horas. En el estudio evaluaron los coeficientes de consolidación secundaria en muestras de turba sin tratar, mientras que los coeficientes de consolidación primaria la midieron en muestras tratadas y no tratadas utilizando diferentes aglutinantes.

Tabla 4.2: Propiedades de la turba de Poncia, Malasia (Adaptado de Dehghanbanadaki et al., 2016).

Características de la turba	Norma	Resultados
Clasificación	ASTM 5715-00	Fibrosa
Clasificación	Von Post	H ₃
Contenido de agua (%)	BS 1377, 1990., part 2	495
Contenido orgánico (%)	BS 1377, 1990., part 3	91
pH	BS 1377, 1990., part 3	4.1
Contenido de fibra (%)	ASTM, 1997-91	80
Proporción de vacíos	BS 1337, 1990, Part 6	11
UCS no perturbada (kPa)	BS 1337, 1990, Part 7	20

Prepararon y curaron en total 106 muestras para el ensayo de compresión no confinada y 218 pruebas para las pruebas de consolidación de células Rowe. Las dosis para las muestras preparadas

con cemento fueron: 250, 300, 350 y 400 kg/m³. Todas las muestras se curaron durante 14, 28 y 90 días, tanto sumergidas en agua como al aire.

Los ensayos de compresibilidad en muestras curadas al aire durante 90 días, el índice de compresión disminuyó de 0.22 a 0.03 cuando la dosis de cemento se incrementó de 300 a 400 kg/m³. Además, la turba tratada con 400 kg/m³ de cemento mostró los índices de compresión más bajos, por lo que los autores sugieren que dicha dosis es adecuada para reducir la compresibilidad de la turba usada.

En el análisis sobre de los efectos del tiempo y de los métodos de curado sobre los índices de compresión de turbas tratadas con cemento en dosis de 300 y 400 kg/m³, no hubo diferencias significativas en el índice de compresión de la turba estabilizada con curado húmedo en comparación con las sometidas a curado al aire.

Axelsson et al. (2002) realizaron una comparación entre tres tipos de turbas estabilizadas con cemento. La primera turba procedente de Arlanda tenía un contenido de húmeda de 442% con una clasificación según von Post de H₈, la cual es bastante descompuesta. Las otras dos turbas provenían de Örebro y su contenido de humedad era de 1308% y 1413% con grados de descomposición según von Post de H₂-H₃ y H₂-H₆ respectivamente. Además, el contenido orgánico de la turba de Arlanda era de 73%, mientras que las turbas de Örebro eran de 99% y 97%, respectivamente. Para este estudio, el umbral de cemento a agregar fue de 250 kg/m³ en la mayoría de los casos. Axelsson et al. (2002) indicaron que la turba de Arlanda estaba muy seca (w=442%) durante la mezcla con el cemento, lo que hacía que la masa estabilizada se desmenuzara y fuera difícil de mezclar, por lo que se añadió agua en algunas muestras para mejorar la mezcla y observar el efecto sobre la eficacia de la estabilización.

En este estudio la preparación y curado de las muestras estabilizadas tuvieron un procedimiento en el cual a la mezcla homogénea entre turba y estabilizador se colocó en un tubo con una presión dispersa de 18 kPa y se dejó a curar 28 días sobre una base de plástico cuyo fondo tenía 50 mm de agua para que las muestras puedan absorber humedad. Los autores indican que este método de prueba está diseñado para parecerse a las condiciones de campo de estabilización de masas. La sobrecarga aplicada es equivalente a 1 m de material de fricción.

En las pruebas de compresión no confinada de las muestras estabilizadas, la turba de Arlanda tuvo resultados muy bajos. Los autores explican que esto se debió a que había muy poca agua para que reaccionara todo el aglutinante. Sin embargo, en las muestras de turba de Arlanda que se añadió agua, los resultados muestran buena eficacia estabilizadora. Lo que confirma la presencia de cemento sin reaccionar en las probetas iniciales y que la adición de agua permitió que se produjeran reacciones hidráulicas. Esta afirmación también se puede observar en las turbas estabilizadas de Örebro, las cuales tenían un alto contenido de humedad y en las pruebas de compresión no confinada tuvieron un aumento en la resistencia al cizallamiento con dosis de cemento en el rango de 150 kg/m³ a 250

kg/m^3 , lo que se podría llamar el umbral de la turba. Sin embargo, una dosis de 400 kg/m^3 da una resistencia menor que 250 kg/m^3 , lo que indica la relación agua: aglutinante tiene un efecto sobre la resistencia del suelo de turba estabilizada.

La relación agua:cemento (W/C) es uno de los factores principales que afectan la resistencia a la compresión de la turba estabilizada (Axelsson et al., 2002; Kalantari et al., 2008; Rahmi et al., 2018). Este factor es importante para tomar en cuenta el método de curado a utilizar y la elección de la dosis de aglutinante, pues como hemos visto en los 3 estudios anteriores, existe una diferencia entre la dosis de aglutinante, el contenido de humedad de la turba en estado natural y el método de curado. Kalantari y Prasad (2014) estudiaron una turba con un contenido de humedad de 417% y se encontró diferencias significativas cuando se curaban por métodos diferentes, resultando el más efectivo el curado en aire, en el cual el cemento solo utilizaba la cantidad de agua presente en la turba para poder reaccionar y mejorar las propiedades del suelo. Sin embargo, Axelsson et al. (2002) con una turba con un contenido de humedad de 442% en una de las turbas, tuvo que agregar agua extra para que el cemento pueda reaccionar de mejor manera, pues de lo contrario la muestra se desmoronaba fácilmente.

Para entender más sobre la influencia del efecto agua: cemento (W/C) sobre la resistencia de la turba estabilizada, Rahmi et al. (2018) realizaron una investigación en la que utilizaron varias proporciones de agua: cemento (W/C) para calcular la dosis de cemento de la mezcla cemento-turba con base a su contenido de humedad de campo y para observar la interacción entre el cemento agregado y el contenido de humedad cedido por el aumento de la resistencia. En este método de diseño de mezcla, el contenido de humedad de la turba se toma muy en consideración como una de las características prominentes de la turba.

Rahmi et al. (2018) utilizaron una turba en Kampung Meranek, Malasia. Las propiedades de la turba utilizada se encuentran en la Tabla 4.3. Para la investigación prepararon el suelo de turba con tres contenidos de humedad diferentes, que son turba con contenido de humedad de 1210% como contenido de humedad de campo (turba A), contenido de humedad de 803% (turba B) y contenido de humedad de 380% (turba C). Para llegar a los dos últimos contenidos de humedad se dejó secar al aire la turba recolectada. Las turbas se estabilizaron con cemento Portland ordinario (OPC) en relación W/C de 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 y 4.0. Las muestras se dejaron a curar al aire y se ensayaron a los 28 y 56 días.

Tabla 4.3: Propiedades de la turba de Kampung Meranek en Malasia (Rahmi et al., 2018).

Propiedades	Valores
Clasificación/von Post	H ₇ -H ₈
Contenido de agua	1210%
Contenido orgánico	96%
Contenido de fibras	32.30%
pH	3.31

De los ensayos, los resultados indicaron que los valores UCS aumentaban a medida que disminuye la relación W/C, lo que significa el aumento de las dosis de cemento. Para las turbas A y B, la relación W/C de 2.0 muestra los valores más altos de UCS, mientras que se muestran valores cercanos a partir de la relación W/C de 2.5 a 4.0. Estos resultados ilustran la cantidad de aglutinante que debe exceder el umbral para neutralizar el ácido húmico, como lo explica Axelsson et al. (2002). Es así que la relación W/C de 2.0 podría asumirse como la relación óptima para la turba A y B. Sin embargo, la resistencia de la turba B es menor que la de la turba A.

Por otro lado, la turba C muestra un comportamiento diferente con la relación W/C. Para la turba C, la relación W/C óptima fue de 2.5, a pesar de que la relación W/C de 2.0 tenga una mayor cantidad de cemento. Este resultado concuerda con el estudio de Dehghanbanadaki et al. (2016), quienes informaron la disminución de la resistencia de la turba estabilizada con cemento después de la cantidad óptima a medida que aumenta el aglutinante en relación con el contenido de humedad de la turba sin tratar.

Además, la resistencia de la turba C es mucho mayor que las muestras de turba A y B. Rahmi et al. (2018) consideran que esto se debe a la turba C tiene una mayor disponibilidad de partículas de suelo y que se producen una reacción puzolánica que ayuda en el aumento de la resistencia en comparación con las turbas A y B, en la que la hidratación del cemento toma un papel más dominante en las muestras, ya que ambas tienen un alto contenido de humedad. Es así que Rahmi et al. (2018) deduce que el aditivo óptimo de diseño de mezcla de proporción W/C en la estabilización de turba es diferente para diferentes contenidos de humedad, en términos del propósito específico de ganancia de resistencia.

Esta conclusión indicaría que la turba de Arlanda tratada por Axelsson et al. (2002) requería una dosificación de cemento menor para alcanzar el umbral de estabilización en función a su contenido de agua natural, ya que comparte ciertas características con la turba analizada por Rahmi et al. (2018), siendo las dos altamente descompuestas, perteneciendo, según la clasificación de von Post, a una clasificación de H₈. Según lo investigado por Rahmi et al., (2018), la adición de cemento por encima del óptimo reduciría los valores UCS de las muestras, como sucedió en la turba de Arlanda estabilizada por Axelsson et al. (2002).

Para entender más sobre las tasas de recargo y su influencia en la estabilización de suelos de turba, Skels et al. (2013), realizaron un estudio para evaluar el efecto de las dosis de aglutinante y las diferentes tasas de recarga al momento de curar las muestras estabilizadas. Realizaron pruebas de compresión no confinada a muestras estabilizadas con tres dosis diferentes de cemento Portland: 200 kg/m³, 250 kg/m³ y 300 kg/m³; y curadas en agua y con tres tasas de recargo diferentes: 0kPa, 6kPa y 18kPa; durante 7, 14 y 28 días. Para dicho fin tomaron muestras de la región de Riga, Letonia. Las propiedades de la turba extraída se pueden ver en la Tabla 4.4.

Los resultados de las pruebas UCS mostraron que la dosis de cemento que alcanzó mayor resistencia con la turba fue de 300 kg/m³, sin importar la tasa de recargo; además se vio que tenía un aumento de resistencia más rápido que las otras dosis, indicando que esta dosificación era óptima para la turba en cuestión.

Las sobrecargas aplicadas tuvieron un efecto visible en la resistencia de la turba estabilizada. Podemos ver un ejemplo de esto con la dosis más efectiva en la Figura 4.5. Sin embargo, Skels et al. (2013) sostienen que hay un efecto notable de la sobrecarga sobre la resistencia de la turba en la etapa inicial de estabilización, mientras que la eficacia de la estabilización en la etapa posterior está determinada por la tasa de dosificación del aglutinante; además indican que se debería a que la tasa de recargo era relativamente baja, es decir, solo 6kPa y 18kPa. Esta tasa de recarga de 18kPa equivale a una precarga normal de aproximadamente 1m de relleno de arena y asegura la base requerida para que la maquinaria de construcción se mueva y continúe con el proceso de estabilización. Además, la mezcla de turba con cemento estabilizada es más homogénea cuando se aplica la precarga.

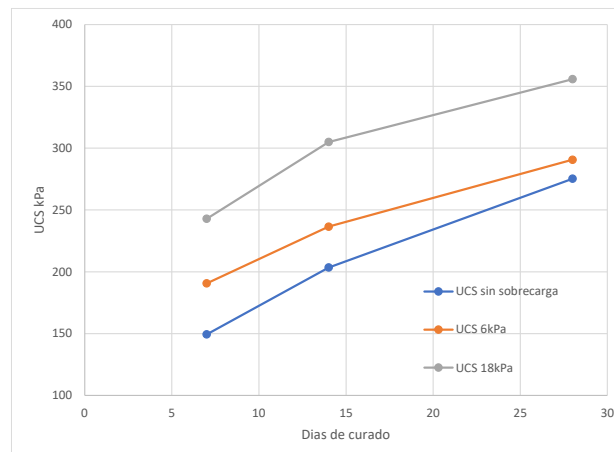


Figura 4.5: Valores UCS en función del tiempo para diferentes tasas de recarga y con una dosis de aglutinante de 300 kg / m³ (Adaptado de Skels et al., 2013).

Tabla 4.4: Propiedades de turba extraída en la región de Riga, Letonia (Skels et al., 2013).

Propiedades	Valores
Contenido de agua	690%
Contenido orgánico	91%
Clasificación/von Post	H ₈ -H ₁₀
pH	5.3

Por lo tanto, por un lado, el proceso de curado al aire hace que las muestras de suelo de turba estabilizadas pierdan gradualmente su contenido de humedad, reduciendo la relación W/C, y a medida que el suelo se vuelve más seco, los valores UCS aumentan (Kalantari et al., 2008), siendo esto un método efectivo para curar muestras estabilizadas con altos contenidos de humedad. En su aplicación en campo, si se tienen las condiciones para reducir el nivel freático de la turba para luego estabilizar y dejar curar, es un método bastante efectivo.

Por otro lado, si no se tienen las condiciones para reducir el nivel freático del suelo, la aplicación de una capa de arena que sirva como sobrecarga al suelo de turba estabilizado con cemento, es otra opción bastante efectiva. Para ambos casos mencionados, se tendría que realizar evaluaciones de las condiciones *in situ*, viendo la disponibilidad de materiales y herramientas para poder aplicar alguno de estos dos métodos.

5. Efecto del uso de aditivos y rellenos adicionales en la estabilización de turbas con cemento

Los estudios sobre mejoras de suelos blandos como la turba normalmente se centran en encontrar una dosis de cemento ideal para mejorar las propiedades geotécnicas de esta clase de suelos tan problemáticos. Se toman en consideración muchos factores relacionados a las turbas, como el origen de la turba, cantidad de contenido orgánico, contenido de humedad, contenido de fibras, pH, grado de descomposición, entre otros (Huat et al., 2014). Sin embargo, a menudo no se puede lograr una ganancia significativa de resistencia con el uso de aglomerante de cemento solo en la estabilización de turba, a menos que se agregue cemento al suelo en cantidades grandes, antieconómicas y no sostenibles con el medio ambiente (Skels et al., 2013; Zulkifley et al., 2014; Kalantari et al., 2014; Saberian et al., 2016).

La industria del cemento genera alrededor del 5% de las emisiones globales de CO₂, pues se estima que la producción de cada tonelada de cemento produce aproximadamente 1 tonelada de CO₂ (Wang et al., 2020). La sustitución parcial del cemento por aglutinantes y el uso de rellenos para reducir la cantidad de cemento a utilizar suelos, ofrece una solución ambientalmente sostenible para reducir el consumo de energía de la producción de cemento, lo que a su vez puede reducir los efectos del calentamiento global y el cambio climático (Wong et al., 2013a).

Además, el uso de aglutinantes y rellenos para estabilizar suelos de turba, puede mejorar las propiedades geotécnicas del suelo estabilizado de forma efectiva, a comparación de utilizar solamente cemento.

Es así que esta sección consistirá en describir y comparar algunos métodos de mejora de turbas con cemento como principal aglutinante con la adición de aditivos y/o rellenos.

5.1. Efectos de rellenos en turbas estabilizadas con cemento

La proporción de huecos in situ de las turbas es muy alta debido a las fibras huecas y al alto contenido inicial de agua (Kazemian et al., 2011a). La relación de vacíos tan alta como 25 se puede encontrar en turba fibrosa, mientras que la proporción de vacíos tan baja como 9 es posible para una turba amorfa más densa (Munro, 2005). Los rellenos naturales juegan un papel vital en la mejora de la unión en la reacción de cementación de la mezcla de suelo (Dehghanbanadaki et al., 2013). En realidad, no existe una reacción química entre los productos de la hidratación del cemento y las partículas de arena, pero aumenta la resistencia del suelo al disminuir la proporción de vacíos de la turba tratada con cemento (Wong et al., 2011).

Con el fin de conocer cuál es el relleno natural que más se adecua para estabilizar turbas, Dehghanbanadaki et al. (2013) realizaron un estudio con el fin de evaluar el efecto de diversos rellenos naturales sobre la resistencia de turba fibrosa estabilizada con cemento en diferentes tiempos de curado. El estudio se centró en encontrar el relleno óptimo y la dosis óptima en la que se pueda

lograr la mayor resistencia al cizallamiento.

Dehghanbanadaki et al. (2013) recolectaron muestras de turba alterada y no alterada en Pontian, en el estado de Johore, Malasia, a una profundidad de aproximadamente 1m. Las características principales de esta turba se pueden observar en la Tabla 4.2. Utilizaron cemento Portland ordinario y cuatro tipos de rellenos naturales que contienen arena bien graduada (SW), grava pobremente mal graduada (GP), arena gruesa mal graduada (C-SP) y arena fina mal graduada (F-SP).

La cantidad de aglutinante utilizada en este estudio se expresó en kg/m^3 en relación con la masa húmeda de la turba. Por ejemplo, si tomamos que la densidad de la turba es 1000 kg/m^3 y si la cantidad de cemento prescrita es 300 kg/m^3 , entonces se necesitan 300 gr de cemento por cada 1000 gr de turba húmeda. La cantidad de aglutinante para cada muestra fue de 300 kg/m^3 en relación con el peso de la turba húmeda en su contenido natural de agua (495%). Añadieron rellenos naturales a la turba de cemento en dosis de aglutinante de 50, 75, 100, 125, 150, 175 y 200 kg/m^3 , en relación con el peso de la turba cementada húmeda. El proceso de curado fue secado al aire y se dejó curar durante 14, 28 y 90 días. El método de prueba utilizado en las muestras estabilizadas con cemento y rellenos naturales fue el ensayo de compresión no confinada (UCS).

El UCS de la turba no estabilizada fue de 20 kPa. Con la utilización de solo cemento, las muestras arrojaron una resistencia de 115.2, 167.3 y 170.93 kPa con una dosis de cemento de 300 kg/m^3 a los 14, 28 y 90 días de curado, respectivamente.

Según los resultados de las pruebas realizadas a las muestras estabilizadas con rellenos naturales, la inclusión de SW y F-SP aumentaron la resistencia al cizallamiento de la turba con cemento y produce UCS significativamente mayor en comparación con aquellos con GP y C-SP. Esto se atribuyó a la inclusión de partículas sólidas de diferente tamaño, que llenaron los huecos de la turba fibrosa estabilizada con cemento (Dehghanbanadaki et al., 2013). También se observó que los rellenos gruesos disminuyen la resistencia al cizallamiento de la turba con cemento.

El UCS de las muestras estabilizadas con solo cemento después de un curado de 90 días fue de 170.93, mientras que el UCS más alto de 188.8 kPa se atribuyó a SW seguido de F-SP y C-SP con UCS de 177.8 y 126.1 kPa, respectivamente. Se puede ver que el uso de C-SP reduce la resistencia de la turba estabilizada con cemento, como se mencionó anteriormente.

El uso de SW en dosis de 75 a 122 kg/m^3 a los 14 días de tiempo de curado aumenta el UCS de la turba de cemento de 115.2 a 125.4 kPa, mientras que el UCS de la turba de cemento disminuye a dosis de 125 a 150 kg/m^3 de 125.4 a 111.8 kPa. La misma tendencia se muestra en el tiempo de curado de 28 días, cuando la dosis de SW varía de 100 a 135 kg/m^3 , el UCS de la turba de cemento aumenta de 163.7 a 178 kPa, mientras que el UCS disminuye cuando las dosis de SW aumentan. Finalmente, el UCS a los 90 días de curado, con dosis entre 50 y 120 kg/m^3 de SW es efectivo para la turba de cemento, aumentando el UCS de 170.93 a 188.8 kPa. Esta tendencia es la misma que a

los 14 días de curado.

Es así que Dehghanbanadaki et al. (2013), indican que las muestras mezcladas con GP y C-SP disminuyen significativamente la resistencia a la compresión de la turba de cemento. Mientras que las muestras mezcladas con F-SP muestran una tendencia a aumentar la resistencia, sin embargo, esta no es significativa y prácticamente sería más económico no utilizarla.

En este estudio la dosis óptima para el tipo de turba estudiada fue de 125 kg/m^3 , dando valores máximos de 125.4, 178 y 188.8 kPa a los 14, 28 y 90 días de curado, respectivamente. En consecuencia, la adición de arena bien graduada como relleno es efectiva para aumentar la resistencia a la compresión de turba con cemento.

Para comprender de mejor manera la efectividad de la arena bien graduada y su importancia en la estabilización de suelos tan problemáticos como la turba, Wang et al. (2020) realizaron un estudio para determinar si la arena manufacturada bien graduada era efectiva para estabilizar turbas con cemento.

En este estudio utilizaron muestras de turba de Yunnan, en el suroeste de China. Las propiedades principales de la turba se pueden observar en la Tabla 5.1. La arena manufacturada fue producida mediante la rotura de roca dura natural y se tamizó a través de un tamiz de 2.36 mm para cumplir con los requisitos de la práctica de ingeniería, siendo esta bien graduada. Como estabilizador principal utilizaron cemento Portland ordinario y yeso como aditivo secundario para mejorar el ambiente ácido y proporcionar más calcio y aluminio disponibles en hidratación (Wang et al., 2020).

Los autores diseñaron un experimento para investigar cómo la arena manufacturada llena los espacios vacíos dentro de la turba e influye en las propiedades mecánicas de la turba estabilizada con cemento. Controlaron el contenido de humedad de la arena para que estuviera cerca al de la turba natural y la mezclaron con turba natural con proporciones de masa de 0:10, 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5, 6:4. La dosificación de cemento fue del 15%, 30% y 45% de la mezcla arena y turba, y la relación agua: cemento fue de 1.0. El yeso fue el 10% de cemento. Utilizaron sales de sodio (NaCl y Ca_2SO_4) para acelerar el proceso de hidratación del cemento y así aumentar la resistencia inicial del suelo estabilizado y su dosificación fue de 3% y 1.5% de cemento, respectivamente. Las muestras estabilizadas se curaron en una cámara ambiental con una humedad superior al 90% durante 28 días. Para evaluar el efecto de la arena manufacturada en la estabilización de la turba con cemento, realizaron pruebas de compresión no confinada (UCS). Además, realizaron pruebas de cizallamiento directo rápido consolidado, por sus siglas en inglés CQDS (Consolidated quick direct shear), para obtener la cohesión y el ángulo de fricción interna de la turba estabilizada.

Tabla 5.1: Propiedades de suelo de turba del suroeste de China (adaptado de Wang et al., 2013).

Propiedades	Valor
Contenido de humedad natural (%)	105.1
Porcentaje de materia orgánica (%)	61.3
Clasificación von Post	H ₈ -H ₁₀
Relación de vacíos	1.72
pH	5.18
Cohesión (kPa)	28.8
Ángulo interno de fricción (°)	13.8

Para evaluar de mejor manera el efecto de la arena sobre la estabilización de la turba, midieron la gravedad específica, el contenido de humedad y la densidad aparente de las muestras y calcularon la relación de vacíos. Además, analizaron los valores de pH en la turba estabilizada después de curar durante 28 días.

Los resultados de este estudio fueron los esperados. A mayor contenido de arena manufacturada, se observó una mayor resistencia y la deformación fue menor en la resistencia máxima, lo que mostró una falla frágil significativa (Wang et al., 2020). Los resultados completos se pueden ver en la Tabla 5.2.

Los valores UCS de las muestras sin arena manufacturada aumentaron a medida que aumentaba el contenido de cemento. Los valores UCS aumentaron notablemente una vez que la turba se mezcló con la arena manufacturada, llegando a superar los valores UCS de turba estabilizada con mayores cantidades de cemento y sin arena manufacturada. Por ejemplo, en el diseño con una dosis de 15% de cemento y una relación de masa de arena a turba de 5:5 y 6:4, los valores UCS (405.2 y 475.14 kPa respectivamente) superan el UCS de la mezcla con 30% de cemento y sin arena. Del mismo modo, en el diseño de mezcla de 30% de cemento con una relación de masa de arena a turba de 3:7, 4:6, 5:5, 6:4, los valores UCS llegan a superar el diseño de mezcla con 45% de cemento y con una relación de masa de arena a turba 4:6. Es notable que la arena manufacturada mejora significativamente el UCS de la turba estabilizada con cemento. Wang et al. (2020) indican que cuanto mayor sea la proporción de arena a turba, menor será la cantidad de cemento a utilizar.

Es notable que el uso de arena manufacturada bien graduada mejora la resistencia de la turba estabilizada con cemento. Con el uso de 15% de cemento y la relación de masa de arena a turba de 5:5 y 6:4, se logra superar los 345 kPa mínimos que se requiere para que una muestra de turba estabilizada sea efectiva. Con un 30% de cemento y sin arena, este valor también es superado.

Tabla 5.2: Resultados UCS de turba estabilizada (adaptado de Wang et al., 2020).

Grupo	Arena: Turba	Turba (g)	Arena (g)	Cemento (g)	Yeso (10%C)	NaCl (1.5%C) (g)	Na ₂ SO ₄ (3%C) (g)	UCS (kPa)
TS-1	0:10	1000	0	150	15	2.25	4.5	182.86
	1:9	900	100					255.24
	2:8	800	200					287.7
	3:7	700	300					313.3
	4:6	600	400					328.7
	5:5	500	500					405.2
	6:4	400	600					475.14
TS-2	0:10	1000	0	300	30	4.5	9	359.9
	1:9	900	100					438.1
	2:8	800	200					489.3
	3:7	700	300					538.2
	4:6	600	400					606
	5:5	500	500					747
	6:4	400	600					879.1
TS-3	0:10	1000	0	450	45	6.75	13.5	506.15
	1:9	900	100					582.7
	2:8	800	200					635.6
	3:7	700	300					657.2
	4:6	600	400					810.4
	5:5	500	500					1235
	6:4	400	600					1416.4

La cohesión y el ángulo de fricción interna de la turba sin tratar es menos, como se puede ver en la Tabla 5.1. La estabilización con cemento y arena manufacturada mejoraron estos parámetros de la turba. La cohesión de la turba aumentó de 28.75 kPa a 99.8, 121.2 y 168 kPa cuando se estabilizó solo con cemento en las dosis de 15%, 30% y 45%, respectivamente. Finalmente, con la adición de la arena manufacturada, la cohesión aumentó a 188.8, 317.5 y 383.6 kPa respectivamente, con una relación de masa de arena a turba de 6:4. Para el ángulo de fricción, los autores indicaron que no existe una correlación notable entre la arena fabricada y los resultados de la prueba, aunque la estabilización provocó un aumento en el ángulo de fricción.

Como se mencionó con anterioridad, para que una estabilización de suelos orgánicos sea efectiva, el pH del suelo estabilizado debe exceder a 9 (Tremblay et al., 2002; ASTM D4609). En este estudio la turba no perturbada tenía un valor de pH de 5.12 siendo esta bastante ácida. Después de la estabilización con cemento, sin arena, los valores del pH alcanzaron 9.4, 10.1 y 10.5 cuando el contenido de cemento fue de 15%, 30% y 45%, respectivamente. La arena manufacturada mejoró el

ambiente ácido para promover la reacción de hidratación y a medida que aumentaba la proporción de arena, los valores de pH aumentaron. Las muestras estabilizadas con una relación de masa de arena a turba de 6:4 alcanzaron un valor de pH de 11.12, 11.52 y 11.8, respectivamente. Wang et al. (2020) concluyeron que la arena fabricada disminuyó los efectos negativos del ácido húmico sobre la turba y el cemento, promoviendo la correcta hidratación del cemento para fortalecer la turba.

Los autores examinaron el efecto del relleno bajo un microscopio. Las imágenes mostraron que la turba estabilizada solo con cemento era mucho más densa en comparación con la turba no perturbada. Además, a medida que se añadía arena, la microestructura del sistema de estabilización se volvía más densa, ayudando así a reducir la proporción de vacíos y mejorar la resistencia de la turba estabilizada.

La arena manufacturada, como se pudo ver, es un relleno eficaz para mejorar de manera más eficiente las propiedades geotécnicas de la turba. Además, su uso hace que se reduzca la cantidad de cemento a utilizar, pudiendo generar así ahorros de costos derivados del uso reducido de cemento y ayudando en la sostenibilidad del medio ambiente. Es así que se han estado buscando más alternativas para poder hacer efectiva la estabilización de suelos de turba con otros materiales además de la arena, que pudieran aportar mayor resistencia a la estabilización y reducir la cantidad de cemento a utilizar.

Saberian y Rahgozar (2016b) sostienen que, aunque se dispone de varios métodos de estabilización de suelos de turba, no se puede esperar que todos ellos resulten efectivos y asequibles en un proyecto en particular. Por lo tanto, acotan que existe una necesidad constante de nuevos métodos. Además, Saberian y Rahgozar (2016b) consideran que los residuos sólidos es una preocupación ambiental importante en el mundo, y la generación y acumulación de llantas desechadas es un problema reconocido. Como solución a este problema, Saberian y Rahgozar (2016b) investigaron la viabilidad de utilizar astillas de llantas desechadas como relleno para estabilizar suelos de turba.

Para dicho fin, recolectaron muestras de turba perturbada y no perturbada del humedal Chaghakhor en Chahar Mahal, Irán. Las propiedades principales de la turba se pueden apreciar en la Tabla 5.3. Para la estabilización del suelo de turba, utilizaron astillas de llantas desechadas (Figura 5.1), arena bien graduada (WS) y cemento Portland ordinario.

La dosificación del cemento fue de 5%, 10% y 15%. La dosis de arena fue de 400 kg/m³ y la dosis de astillas de llantas fue de 10%. Esta última dosificación se determinó en el estudio realizado por Saberian y Rahgozar (2016a), la cual consistió en determinar la cantidad óptima de astillas de llantas trituradas en combinación con arena para estabilizar un suelo de turba. Las muestras estabilizadas se curaron sumergidas en agua y con una sobrecarga de 50kPa. Las pruebas para determinar la resistencia de la turba estabilizada fue el ensayo de compresión no confinada y la prueba de corte directo. Estas pruebas se realizaron a los 7, 14 y 28 días de curado. Además, midieron el pH de las muestras estabilizadas para determinar qué tan efectiva fue la estabilización.

Tabla 5.3: Propiedades de suelo de turba del humedal Chaghakhor, Iran (Adaptado de Saberian y Rahgozar, 2016a).

Propiedades	Norma	Valores
Contenido de agua	ASTM D2974-87	446-593 %
Clasificación	Von Post	H2-H4
pH	BS 1377:1990	4
Contenido orgánico	ASTM D2974-87	85.50%
Contenido de fibras	ASTM 1997-91	81.50%
UCS turba sin tratar	ASTM D2166-06	6.3 kPa



Figura 5.1: Astillas de llantas trituradas. Las dimensiones de cada una son 20 x 15 x 0.5 mm (Saberian y Rahgozar, 2016).

Los resultados de las pruebas UCS, los resultados de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción sacados de la prueba de corte directo, así como los valores medidos de pH realizadas a las muestras de turba estabilizadas después de 28 días de curado se pueden ver en la Tabla 5.4.

Considerando que el UCS de la turba sin estabilizar es de solo 6.3 kPa, con el uso de arena y astillas de llantas trituradas sin ningún aditivo, el UCS se incrementa 405.4 kPa, siendo este un valor que se considera efectivamente estabilizado ($UCS > 345$ kPa). Sin embargo, cuando se agrega cemento a la mezcla, el UCS de la turba aumenta de forma considerable. Además, del mismo modo como en el estudio anteriormente descrito, se verificó que el pH de la turba estabilizada pase del valor de 9 para que la estabilización del suelo sea eficaz. Los resultados del pH para las dosificaciones de cemento de 5%, 10% y 15% fueron 8.5, 9.1 y 10.1, respectivamente. El requisito de $pH \geq 9$ se cumplió con cemento Portland ordinario al 10% y al 15%.

Los resultados de la prueba de corte directo muestran que la turba sin tratar tenía una cohesión de 11.2 kPa y un ángulo de fricción interna de 17.8° . Los parámetros de resistencia al corte no mejoraron significativamente al aumentar el porcentaje de cemento.

Tabla 5.4: Resultados de la prueba UCS de turba estabilizada con distintas dosis de cemento (adaptado de Saberian y Rahgozar, 2016).

Cemento (%)	Arena (kg/m ³)	Astillas de llantas (% en peso)	UCS (kPa)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (ϕ)	pH
-	-	-	6.3	11.2	17.8	4
-	400	-	67	14	36.4	-
-	400	10	405	75.8	38.8	-
5	400	10	609.5	158.5	40.9	8.5
10	400	10	739	178.6	41.9	9.1
15	400	10	774.4	196.4	43	10.1

En el estudio realizado por Saberian y Rahgozar (2016b) se comprobó que el uso de astillas de llantas trituradas que fueron desechadas, en combinación con arena bien graduada y cemento, mejoran las propiedades geotécnicas de los suelos de turba de manera eficaz. Esta alternativa ofrece grandes posibilidades al momento de realizar una estabilización de suelos altamente orgánicos.

Es así que la arena bien graduada ofrece una alternativa eficaz para estabilizar suelos de turba, ya que, a pesar de no reaccionar químicamente con el cemento o el suelo, este funciona reduciendo la proporción de vacíos del suelo y proporciona un mayor número de partículas de suelo disponibles para que los aglutinantes como el cemento se unan y formen una estructura de suelo estabilizado. Además, como se pudo ver en el estudio de Wang et al. (2020), la arena manufacturada mejora el ambiente ácido de la turba, ayudando así al cemento en un mejor proceso de hidratación.

5.2. Efectos de aditivos en turbas estabilizadas con cemento

La estabilización de suelos de turba con cemento como único aglutinante en ocasiones no es suficiente para mejorar las propiedades de la turba a menos que se agreguen cantidades de cemento antieconómicas y antiecológicas (Skels et al., 2013; Zulkifley et al., 2014; Kalantari et al., 2014; Saberian et al., 2016). Como se pudo ver en el acápite anterior, el uso de rellenos como la arena, mejora las propiedades de la turba y ayuda al cemento a realizar una correcta hidratación en su contacto con el agua natural de la turba, además que le da una mejor estructura donde el cemento pueda cementarse de mejor forma.

Sin embargo, el uso de otros aditivos químicos o aditivos no reactivos, pueden ayudar a mejorar las propiedades de suelos de turba de diferentes maneras. Se han realizado múltiples estudios para determinar cuáles de estos son los más eficientes al momento de realizar una estabilización. En el proyecto EuroSoilStab (2002), un proyecto desarrollado por la Comunidad Europea en 1997, realizaron un programa de investigación con el fin de desarrollar métodos de diseño y construcción para estabilizar suelos orgánicos blandos para la construcción de infraestructura ferroviaria, vial y de otro tipo. El proyecto demostró que el uso de distintos tipos de aglutinantes puede estabilizar suelos

orgánicos blandos; además concluyó que agregar arena a la mezcla de aglutinantes mejorará los resultados. En la Tabla 5.5 se ven ejemplos de aumento de resistencia relativa basados en pruebas de laboratorio en suelos nórdicos con diferentes mezclas de aglutinantes en diferentes tipos de suelo realizados por el proyecto EuroSoilStab.

Tabla 5.5: Aumento de la resistencia relativa basado en pruebas de laboratorio (resistencia a la compresión no confinada después de 28 días de curado) en suelos nórdicos (adaptado de EuroSoilStab, 2002).

Aditivo	Limo	Arcilla	Suelos orgánicos: Arcilla orgánica, Gyttja	Turba
	Contenido orgánico 0-2%	Contenido orgánico 0-2%	Contenido orgánico 2-30%	Contenido orgánico 50-100%
Cemento	xx	x	x	xx
Cemento + yeso	x	x	xx	xx
Cemento + escoria de horno	xx	xx	xx	xxx
Cal + cemento	xx	xx	x	-
Cal + yeso	xx	xx	xx	-
Cal + escoria	x	x	x	-
Cal + yeso + escoria	xx	xx	xx	-
Cal + yeso + cemento	xx	xx	xx	-
Cal	-	xx	-	-

xxx Excelente aditivo en muchos casos
 xx Bueno en muchos casos
 x Bueno en algunos casos
 - No adecuado

Como es posible observar, el cemento es el aditivo más eficaz para estabilizar suelos de turba, como ya se había mencionado. Además, su uso con yeso y escoria de horno también resultar ser efectivos al momento de realizar una estabilización. Sin embargo, el avance de la química del cemento en los últimos años ha visto la posibilidad de utilizar una variedad de aditivos para estabilizar la turba (Wong et al., 2013b). Algunos de estos aditivos, tanto químicos como no reactivos se verán a continuación.

5.2.1. Aditivos químicos

Como se pudo ver en la Tabla 5.5, el yeso y la escoria de alto horno son aditivos que tienen un efecto importante al momento de estabilizar suelos de turba con cemento. La influencia de la escoria de alto horno es importante, por lo cual Kalantari (2011) realizó una investigación de laboratorio para estudiar el efecto de la escoria de alto horno como aditivo a una mezcla de turba estabilizada con cemento Portland ordinario como aglutinante. Las pruebas de resistencia utilizadas

en este estudio fueron la resistencia a la compresión no confinada (UCS) y California bearing ratio (CBR). El método de curado utilizado fue curado al aire. Para tal propósito recolectaron turba perturbada y sin perturbar de Kampung, Jawa en la parte occidental de Malasia. Las propiedades principales de este tipo de turba se pueden ver en la Tabla 5.6.

La escoria de alto horno granulada molida es un material puzolánico granular que se forma cuando la escoria de alto horno de hierro fundido se enfría rápidamente por inmersión en agua (Kalantari, 2011). La escoria de alto horno se considera un material hidráulico latente. La reacción producida por la escoria de horno es más lenta que la del cemento, por lo tanto, proporciona una ganancia de resistencia más lenta y una evaporación de calor más baja que con el cemento (Axelsson et al., 2002; Kalantari, 2011).

Tabla 5.6: Propiedades de turba de Kampung, Jawa – Malasia (Adaptado de Kalantari, 2011)

Propiedades	Norma	Valores
Contenido de agua	ASTM D2216 BS	198 - 417 %
Gravedad específica		1.22
Clasificación	Von Post	H ₄ -H ₅
Contenido orgánico	ASTM D2974	80.23%
pH	BS 1337	6.40
UCS (Inalterado)	ASTM 2166-6, AASHTO T208-706	28.5 kPa
CBR (Inalterado)	ASTM D1883-73, AASHTO T193-63	0.78%

Las dosis de cemento utilizadas en este estudio fueron desde 3.75% al 50%. Las cantidades de cemento utilizadas en el estudio se basaron en el peso húmedo total de la turba (por ejemplo, 3.75% de media de OPC por cada 100 g de turba húmeda total, se agregaron 3,75 g de OPC). Las dosis de escoria de alto horno fueron desde 1.25% hasta 22.5%.

La investigación primero preparó muestras de turba estabilizada con cemento y escoria de alto horno las cuales curaron al aire durante 90 días. Los resultados obtenidos de las pruebas UCS se utilizaron para hacer muestras de CBR que se curaron y analizaron a las 24 horas, 28 días y 90 días. Las pruebas CBR las realizaron en dos condiciones: remojadas y sin remojar. Las muestras se remojaron para una mejor simulación del campo o condición *in situ* (Kalantari, 2011). El proceso de estabilización normalmente comienza con la reducción del nivel freático, mezclando el suelo de turba con aglutinantes y/o aditivos, curando al aire el suelo mezclado durante 90 días y luego devolviendo el nivel freático al nivel original (Kalantari et al., 2011). Por lo tanto, para simular la condición de campo, los autores mezclaron las muestras con cemento y escoria de horno, curaron al aire y luego se remojaron antes de analizar las pruebas CBR.

De los resultados de las pruebas UCS, las mezclas que proporcionaron los valores más altos de resistencia fueron a) 3.75% OPC y 1.25% E, b) 11.25% OPC y 3.75% E, y c) 22.5% OPC y 7.5% E. Estas dosificaciones se utilizaron para las pruebas de compactación y posteriormente en las

pruebas CRB. También realizaron pruebas de compactación en muestras de turba sin tratar (0% OPC + 0% E), así como en muestras de turba tratada con 50% cemento y escoria de horno (22.5% OPC + 22.5% E) como muestras de medidas de control.

Tabla 5.7: Resultados de pruebas de resistencia en suelo de turba (adaptado de Kalantari, 2011).

OPC (%)	Escoria de horno (%)	UCS (kPa)	CBR 28 días (%)	CBR 90 días (%)	CBR (%) remojado
3.75	1.25	239.6	18.7	56	8
11.25	3.75	175	27.7	44	18
22.5	7.5	244.8	34	48.9	22.2

Los resultados del estudio realizado por Kalantari (2011) se muestran en la tabla 5.7. En esta tabla se puede ver que la muestra que contiene menos cemento y escoria de horno obtuvo un valor más alto de CBR sin remojar (56%) y el más bajo cuando se remojó (8%). Kalantari (2011) sostiene que la ganancia de resistencia de esta muestra no proviene de enlaces químicos producidos a través del cemento, escoria de alto horno y agua; sino que se debe al secado de las fibras de madera dentro de las muestras de turba. Esto debido a que a medida que estas fibras pierden su contenido de humedad, se vuelven más sólidas, pero pierden la mayor parte de sus valores de resistencia adquiridos cuando se prueban en condiciones de remojo.

Además, con los resultados también indica que, a medida que aumenta el contenido de cemento de la turba estabilizada, la ganancia es mayor. También a medida que aumentan las tasas de dosificación de escoria de alto horno y cemento, los valores CBR para muestras remojadas aumentan.

Según Axelsson et al. (2002) y Hebib y Farrell (2003), cuando la escoria de alto horno se mezcla con cemento, el fraguado se vuelve más lento, del mismo modo, cuando se agrega escoria de alto horno a la mezcla de cemento y turba, esto hace que la mezcla fragüe aún más lento.

Por lo tanto, cuando se agrega cemento y escoria de alto horno para estabilizar la turba, se espera que gane resistencia con el tiempo y que se endurezca más tarde (Kalantari, 2011). Sin embargo, la estabilización resultará más resistente en comparación a utilizar cemento por sí solo.

Así como se utiliza escoria de alto horno para estabilizar suelos de turba con cemento, otro aditivo químico que puede mejorar las propiedades de la turba es el humo de sílice. Para probar la efectividad de este aditivo, Kalantari et al. (2011) realizaron un estudio de laboratorio para estabilizar suelo de turba con cemento como aglutinante y humo de sílice como aditivo. El humo de sílice es un material puzolánico extremadamente fino de sílice altamente amorfa, resultante de la condensación del vapor ascendente que se desprende en la fabricación de ferrosilicio y silicio metálico en hornos de arco eléctrico de alta temperatura (Kalantari et al., 2011).

El suelo de turba recolectada para este estudio fue de Kampung, Jawa en la parte occidental

de Malasia. Las propiedades principales de este tipo de turba se pueden ver en la Tabla 5.6. Para medir la resistencia de las muestras estabilizadas con cemento y humo de sílice, realizaron pruebas UCS y CBR (remojado y sin remojar). El método de curado utilizado fue el curado al aire.

Después de curar al aire durante 90 días, las muestras se analizaron para UCS en dos condiciones: remojadas y sin remojar. Del mismo como que el anterior estudio, las muestras se remojaron para una mejor simulación de lo que ocurre *in situ*.

Las tasas para las pruebas UCS fue de cemento en cantidades de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 y 50% en peso húmedo total de la turba (por ejemplo, 5% de media de OPC por cada 100 g de turba húmeda total, se agregaron 5 g de OPC). Las cantidades de humo de sílice fueron del 5% y el 10% en peso de húmedo total de la turba. Para las pruebas CBR, las cantidades de cemento fueron de 5, 15 y 25%, y las cantidades de humo de sílice fueron 5% y 10%.

Según la revisión de literatura realizada por Kalantari et al. (2011), se ha observado que la adición de 15% y 20% de humo de sílice disminuye la resistencia a la tracción del concreto de 90 días en un 15% y 20% respectivamente. Además, el reemplazo de cemento por dosis más altas de humo de sílice resultó en una disminución en la resistencia a la tracción del mortero.

Por lo tanto, guiados en base a estos estudios, Kalantari et al. (2011) para determinar el porcentaje óptimo de humo de sílice para el suelo de turba estabilizado que daría los valores máximos de resistencia tanto para UCS como para CBR, se mezclaron muestras de suelo de turba con 5% y 10% de humo de sílice en peso húmedo total de la turba.

Tabla 5.8: Resultado de pruebas UCS y CBR (Adaptado de Kalantari et al., 2011).

Cemento (%)	Humo de sílice (%)	UCS (kPa)	UCS remojado (kPa)	CBR (%)	CBR remojado (%)
5	0	287	77	18.5	5.6
5	5	296	-	-	-
5	10	320	128	21.4	11.4
15	0	300	95	24	11.4
15	5	280	-	-	-
15	10	331	165	29.4	15.5
25	0	330	268	26	16.7
25	5	380	315	34	20.4
25	10	193	-	-	-
40	5	427	-	-	-
40	10	294	-	-	-
50	5	626	-	-	-
50	10	398	-	-	-

Los resultados de las pruebas se pueden observar en la Tabla 5.8. De esta se puede observar

que una dosis de 10% de humo de sílice dio valores de UCS más altos con cemento de 5% y 15%. Sin embargo, con un contenido de cemento de 25%, 40% y 50%, la dosis que dio resultados más altos fue de 5% de humo de sílice.

Del mismo modo, también se puede observar que el UCS de la muestra con 5% de cemento y 10% sílice, tiene un valor más alto en comparación cuando se utiliza 15% de cemento solo. De igual forma, la muestra con 15% de cemento y 10% de humo de sílice, tiene un valor de UCS similar al de 25% de cemento solo. Esto demuestra que el uso de humo de sílice ahorra cemento.

En cuanto a los resultados de la prueba CBR, los valores indica que a medida que la cantidad de cemento se incrementa junto con el humo de sílice, el CBR aumenta tanto del suelo de turba estabiliza sin remojar como el remojado. También se puede ver que el uso de humo de sílice reduce la necesidad de cemento, pues el CBR de la turba con un 15% de cemento y un 10% de humo de sílice es más alto que el CBR de la turba con un 25% de cemento solo.

El caolín es otro aditivo puzolánico que puede ser aplicado para estabilizar turba con cemento. Wong et al. (2013a) realizó un estudio experimental de laboratorio para demostrar que su uso, junto con cemento compuesto Portland (PCC), puede mejorar de manera más efectiva las propiedades geotécnicas de un suelo de turba, a comparación de utilizar solo cemento como aglutinante.

El caolín es un subgrupo de minerales arcillosos que se identifica comúnmente como arcilla blanca y blanda que exhibe plasticidad con la composición de partículas parecidas a placas de grano fino (Wong et al., 2013a). En general, se reconoce que el caolín se puede utilizar como puzolana natural para reemplazar parcialmente el cemento en aplicaciones de ingeniería civil (Wong et al., 2013a). Sin embargo, según Wong et al. (2013a), el uso del caolín como puzolana natural para la estabilización de suelos de turba no se ha explorado por completo debido a la falta de investigación con resultados fiables sobre la estabilización de la turba. Además, el caolín se puede utilizar para reemplazar parcialmente el cemento como una ventaja medioambiental y económica para reducir el uso de cemento en el suelo estabilizado.

En la investigación de Wong et al. (2013a), evaluaron el efecto del caolín sobre la resistencia y permeabilidad de la turba estabiliza en laboratorio. Para dicho fin, recolectaron turba alterada y no perturbada del estado de Selangor en Malasia. Las propiedades principales de la turba extraída se pueden observar en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9: Propiedades de turba del estado de Selango, Malasia (Adaptado de Wong et al., 2013a).

Características de la turba	Valores
Clasificación (von Post)	H ₆
Contenido de agua (%)	668.3
Contenido orgánico (%)	96
pH	3.51
Contenido de fibra (%)	90
Proporción de vacíos	9.33

Los materiales utilizados para verificar el efecto del caolín como aditivo estabilizante fueron cemento compuesto Portland, cloruro de calcio y arena de sílice bien graduado. A diferencia de las otras investigaciones mencionadas a lo largo de este trabajo, en este estudio utilizaron cemento compuesto Portland (PCC) en vez de cemento Portland ordinario (OPC). Las diferencias químicas entre estos dos tipos de cemento se pueden observar en la Tabla 5.10. El cemento compuesto Portland es un cemento especial formulado con la adición de un 2% de superplastificante por unidad de peso de cemento para estabilizar suelos altamente orgánicos como la turba, ya que la adición del superplastificante ayuda a dispersar el cemento en el suelo durante el proceso de hidratación (Wong et al., 2013a). Adicionalmente los autores agregaron cloruro de calcio al 4% en peso del cemento al cemento compuesto Portland para que funcionara como un acelerador del cemento. De la Tabla 5.10, el hallazgo de CO₂ en el PCC, que no se rastrea en el OPC, implica la existencia de una pequeña cantidad de superplastificante en el PCC para mejorar la dispersabilidad del cemento durante el proceso de hidratación del cemento en el suelo (Wong et al, 2013a)

Tabla 5.10: Composiciones químicas cemento OPC y PCC.

Componentes	OPC (%)	PCC (%)
CaO	65.6	59.9
SiO ₂	21	17.9
Al ₂ O ₃	5.3	5.1
Fe ₂ O ₃	3.3	4.3
SO ₃	2.7	3.6
MgO	1.1	0.7
Na ₂ O	1	0.1
CO ₂	-	7.3

Los diseños de las mezclas realizadas se evaluaron en pruebas UCS. Las muestras se curaron en agua con una sobrecarga de 100kPa. Sobre la base del mejor diseño de mezcla desarrollado a partir de los resultados de las pruebas UCS, se prepararon muestras de prueba de turba estabilizada para las pruebas de permeabilidad.

Los resultados de los distintos diseños para evaluar las dosis ideales de cemento, arena y caolín

arrojaron que la dosis ideal de arena de sílice bien graduada era de 596 kg/m³. En cuanto a la dosis de aglutinante se observó que la dosis ideal para alcanzar el umbral de estabilización fue de 300 kg/m³. Después de haber evaluado estas dosis, se evaluó los efectos de la composición del aglutinante. Los resultados se pueden observar en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11: Resultados de prueba UCS a los 7 días de curado (Adaptado de Wong et al., 2013a)

Dosis de aglutinante= 300 kg/m ³		Arena de sílice (kg/m ³)	UCS (kPa)
Cemento (%)	Caolín (%)		
100	-	596	180
95	5	596	415
90	10	596	485
85	15	596	456
80	20	596	423
75	25	596	361

Se puede observar en la Tabla 5.11 que la dosis ideal de aglutinante es de 90% cemento y 10% de caolín, junto con 596 kg/m³ de arena de sílice. Además, al utilizar únicamente PCC como aglutinante, el valor UCS alcanzado está muy por debajo de lo requerido, y se puede notar que con solo 5% de caolín la resistencia de las muestras aumenta considerablemente. A los 28 días de esta combinación, las muestras estabilizadas alcanzan un valor UCS de 574 kPa, muy por encima de los 345 kPa mínimos que se necesita para que un tratamiento se considere efectivo. Además, el resultado del pH de esta muestra, resulta en 11.45, lo cual también se considera como efectivamente estabilizado, pues está por encima de 9. Es posible afirmar que el uso del caolín como aditivo puzolánico reduce el uso del cemento al momento de estabilizar suelos de turba.

En una comparación realizada en este mismo estudio, probaron estabilizar la turba con OPC con caolín en la misma dosis mostrada anteriormente. Los resultados fueron bastante bajos, alcanzando un UCS de apenas 70kPa, lo cual hace indicar que el PCC es mucho más efectivo que el OPC en cuanto a estabilizar este tipo de suelo de turba con caolín.

En las pruebas para medir la tasa de permeabilidad, la turba natural a una temperatura estándar tenía una tasa de permeabilidad de 6.25×10^{-6} m/s. Según indican los autores, esta tasa de permeabilidad es equivalente a la arena muy fina o limosa. Después de haber realizado la estabilización y de haber curado las muestras durante 7 días, encontraron que la tasa de permeabilidad era de 9.75×10^{-13} m/s, siendo este valor bastante bajo y equivalente a la arcilla intacta debajo de la zona de meteorización (Wong et al., 2013a).

Otro aditivo puzolánico natural que es reconocido por poder mejorar las propiedades mecánicas de los materiales cementados debido a su finura y alto contenido de sílice y alúmina es la bentonita de sodio (Wong et al., 2013b). Wong et al. (2013b) realizaron una investigación de

laboratorio sobre la aplicación de bentonita de sodio para maximizar el relleno y los efectos puzolánicos de la turba estabilizada. De forma similar al estudio anterior descrito, los autores utilizaron además de bentonita de sodio, el cloruro de calcio, cemento compuesto Portland (PCC) y arena de sílice bien graduada para una turba en el área de Klang, Malasia. Las propiedades principales de este tipo de turba se pueden observar en la Tabla 5.12

Tabla 5.12: Propiedades de turba del área de Klang, Malasia (Adaptado de Wong et al., 2013b).

Características de la turba	Valores
Clasificación (von Post)	H ₃ -H ₇
Contenido de agua (%)	668.0
Contenido orgánico (%)	92.5
pH (BS 1377, 1990)	3.5
Contenido de fibra (%)	91.0
Proporción de vacíos	8.0

Para evaluar el efecto óptimo de la bentonita de sodio, prepararon distintas muestras con diferentes composiciones que varían de 5% a 40% para la estabilización de turba. Las muestras se curaron sumergidas en agua y se evaluó su resistencia a los 7, 14, 28, 56 y 90 días de curado. Las muestras estabilizadas se sometieron a distintas pruebas, entre las cuales está la prueba UCS y pruebas de cizallamiento directo y de permeabilidad para establecer sus parámetros de cohesión, ángulo de fricción y coeficiente de permeabilidad.

Se tomaron en cuenta distintos factores que afecta la reactividad de la puzolana en turba estabilizada, como la composición del ligante, el tipo de ligante, la dosis del ligante y la duración del curado. De los resultados, la dosis óptima de arena de sílice bien graduada resultó ser igual al estudio anterior: 596 kg/m³. La dosis de aglutinante fue de 300 kg/m³. De los resultados mostrado en el estudio, las muestras con un 10% de reemplazo parcial de PCC con bentonita de sodio tienen la resistencia a la compresión no confinada más alta de 415 kPa después de 7 días de curado. Sin el reemplazo de cemento por bentonita, las muestras alcanzaban una resistencia de 375 kPa.

En cuanto a los otros parámetros, la turba inalterada mostraba una cohesión de 10 kPa y un ángulo de fricción de 8°. Con el reemplazo de 10% de cemento por bentonita de sodio, estos valores se incrementaron a 262 kPa y 43.2°, respectivamente. Del mismo modo, en cuanto al coeficiente de permeabilidad, la turba inalterada a una temperatura estándar de 20°C, era de 6.25 x 10⁻⁶ m/s, comparable al de la arena muy fina y limosa. Después de la estabilización, el coeficiente de permeabilidad se redujo a 5.68x10⁻¹³ m/s, comparable al de la arcilla intacta debajo de la zona de erosión (Wong et al., 2013b).

5.2.2. Aditivos no reactivos

Así como existen y se utilizan múltiples aditivos químicos para mejorar las propiedades de los suelos, y los cuales resultan en algunos casos efectivos, los aditivos no reactivos químicamente también son bien utilizados para lograr mejoras en la resistencia al momento de estabilizar suelos. Kalantari et al. (2008, 2010, 2012) realizaron múltiples estudios experimentales con fibras de polipropileno y fibras de acero para poder reforzar de mejor manera la turba estabilizada con cemento (Figura 5.2).

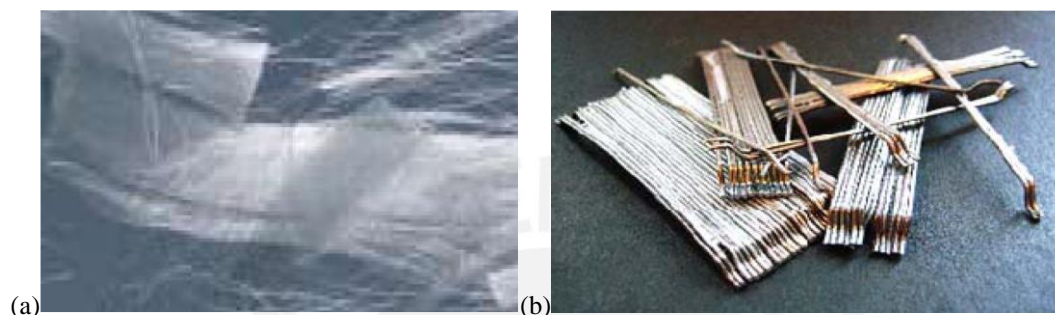


Figura 5.2: a) Fibras de polipropileno y b) Fibras de acero (Kalantari y Huat, 2010).

Kalantari y Huat (2008) estabilizaron una turba fibrosa de Kampung, Jawa en la parte occidental de Malasia, las mismas que se pueden observar en la Tabla 5.6. El programa experimental del estudio consistió en hallar valores de resistencia del suelo de turba no perturbado, así como del suelo de turba estabilizado con cemento y fibras de polipropileno mediante las pruebas de resistencia a la compresión no confinada (UCS) y la prueba de California Bearing Ratio (CBR), tanto sin remojar como remojado. Para la primera prueba se curó las muestras en aire y se ensayó a las edades de 28, 90 y 180 días. El periodo de curado utilizado para las pruebas CBR fue de 90 días. Los autores utilizaron el curado en aire ya que la turba al tener alto contenido de humedad, considerando la relación agua: cemento (W/C), las muestras se fortalecerían mediante la reducción gradual del contenido de humedad, volviéndose más secos y duros.

Para las pruebas UCS se mezcló el suelo de turba con diferentes dosis de cemento Portland ordinario (15%, 30% y 50%) (por ejemplo, 15% de cemento significa en cada 100 gr. de suelo de turba con contenido de humedad natural (campo), 15 gr de cemento portland ordinario añadido en polvo) con y sin fibras de polipropileno. Las cantidades de fibras de polipropileno utilizadas fueron 0.1%, 0.15% y 0.25% (por ejemplo, 0.15% de fibras medias por cada 100 gr. de suelo de turba con su contenido de humedad in situ (campo), 0.15 gr. de fibras de polipropileno adicional). Para las pruebas CBR, las muestras se mezclaron con cemento con dosis de 15, 25, 30, 40 y 50% de cemento Portland ordinario. La cantidad de fibras de polipropileno utilizada para las muestras de suelo fue de 0.15%. De los resultados de las pruebas UCS, se determinó que la dosis óptima de fibras que alcanza valores máximos de resistencia a la compresión fue de 0.15%. Por tal motivo esa dosificación la

utilizaron para las pruebas de CBR, ya que es el más óptimos para proporcionar valores máximos.

Los resultados de mezclar las dosis de cemento junto con 0.15% de fibras de polipropileno aumentaron los valores de resistencia de la turba, a comparación de utilizar solo cemento. Una muestra de eso se puede ver en la Figura 5.3, en la cual es posible observar que los valores UCS de combinar 30% de cemento y 0.15% de fibras de polipropileno son más altos que cuando se utiliza cemento solo, ya sea con una dosificación de 30%, o una dosificación más alta de 50% de cemento, lo que indica que el uso de fibras de polipropileno disminuye el uso de cemento.

Los resultados en los ensayos de CBR indica que a medida que se aumenta la cantidad de cemento en la mezcla, los valores de CBR aumentan y la adición de contenido de fibras de polipropileno aumentara aún más los valores de CBR. Las fibras de polipropileno como aditivo aportan más resistencia a la dosis más baja de OPC (15%) mezclada con muestras de suelo de turba en comparación con una dosis más alta de OPC (50%) en la mezcla (Kalantari y Huat, 2008).

Kalantari y Huat (2008) afirman que las fibras de polipropileno no solo aumentan los valores de CBR sino que también contribuyen a una cantidad considerable de uniformidad e integridad a las muestras de suelo de turba estabilizada, en comparación con las muestras de suelo de turba estabilizada que solo tienen cemento Portland ordinario.

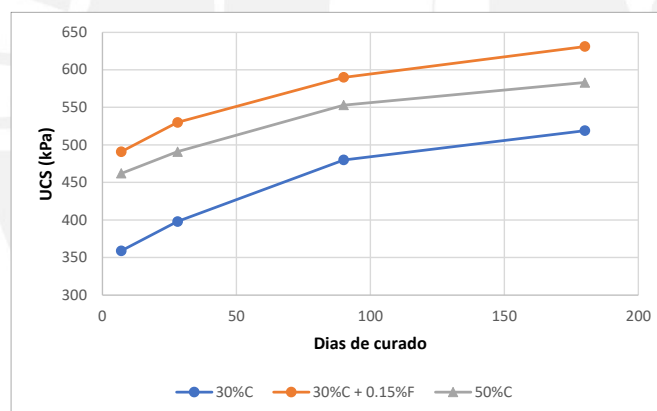


Figura 5.3: Valores UCS de turba estabilizada con turba y fibras de polipropileno (adaptado de Kalantari et al., 2008).

Kalantari (2012) realizó un estudio similar al de Kalantari y Huat (2008) utilizando fibras de polipropileno y el mismo tipo de turba para verificar de mejor manera el comportamiento de la turba estabilizada con cemento y la adición de las fibras con el uso del contenido de humedad óptimo. En el estudio se volvió a comprobar que para este tipo de turba la dosis óptima de fibras de polipropileno era de 0.15%, obtenido de los resultados de pruebas CBR con dosis de cemento de 5, 15 y 25% y con un curado al aire durante 28 y 90 días.

El UCS de las muestras estabilizadas aumentaron de 28.5 kPa de para turba no perturbada a 380 kPa para turba estabilizada con 15% de cemento y 0.15% de fibras, superando el UCS mínimo que se considera para que el suelo este correctamente estabilizado. Además, las pruebas CBR indican que a medida que aumenta el periodo de curado, los valores de CBR también aumentan. Con el

aumento del contenido de cemento, los valores de CBR también aumentan. Además, con la adición de 0.15% de fibras a las muestras de turba estabilizadas con cemento aumentan los valores de CBR sobre las muestras sin fibras. Los valores de CBR aumentaron de 0.8% para turba sin perturbar a 145% para la turba estabilizada con 50% de cemento y 0.15% de fibras.

Adicionalmente, Kalantari et al., (2010) realizaron un estudio para determinar si el uso de fibras de acero y las fibras de polipropileno (Figura 5.2) mejoraban las propiedades del suelo de turba estabilizado con cemento. Las propiedades de suelo de turba se encuentran en la Tabla 5.6.

Realizaron pruebas UCS y CBR con dosis de cemento de 5, 15 y 30%. La dosis de fibras de polipropileno fue de 0.15%, pues es la que resultó óptima después de haber realizado múltiples ensayos UCS. Además, la cantidad de fibras de acero utilizada fue de 2 y 4% en peso de la turba húmeda. Todas las muestras fueron curadas al aire.

Los resultados de las pruebas UCS arrojaron que el uso de 0.15% de fibras de polipropileno y 2% de fibras de acero en conjunto mejoraban de manera significativa la resistencia de la turba estabilizada con cemento. Con una dosis de 5% de cemento, el UCS de la turba aumentó de 210.2 a 316 kPa; y cuando se añade 0.15% de fibras de polipropileno, el aumento del UCS fue de 210.2 a 367 kPa. Con el 2% de fibras de acero, el aumento fue de 210.2 a 332 kPa. Pero cuando se añaden ambas fibras a la mezcla de turba con cemento, el aumento fue de 267.5%, es decir, de 210.2 a 772.5 kPa. De manera similar, con una dosis de cemento de 15% y la adición de ambos tipos de fibras, el aumento del UCS fue de 254.9%, es decir, de 210.2 a 746 kPa.

El uso de fibras de polipropileno al 0.15% da resultados de pruebas UCS más altos en comparación con el uso de fibras de acero al 2%. Sin embargo, si ambas dosis de fibras se utilizan juntas, el UCS de las muestras mejora considerablemente.

Kalantari et al. (2010) indican que las muestras con un 5% de cemento dan como resultado un UCS más alto que con un 15% de cemento debido al hecho de que las muestras con una pequeña cantidad de cemento (5%) pierden humedad durante el periodo de curado y ganan fuerza, no por la unión entre las partículas de turba o los productos de hidratación, sino más bien por el secado de las fibras de turba. Por lo tanto, a medida que las fibras de las muestras de turba estabilizada pierden humedad, las muestras estabilizadas muestran UCS más alto. Además, observaron que las muestras mostraban un comportamiento frágil, pero las muestras con fibras de polipropileno mostraron un comportamiento más dúctil.

Axelsson et al. (2002) señala que la cantidad de aglutinante requerida para fortalecer de manera ideal suelos altamente orgánicos como son las turbas es de aproximadamente 15% de cemento. En el estudio de Kalantari et al. (2010), lograron resultados comparables con solo 5% de cemento, 0.15% de fibra de polipropileno y 2% de fibras de acero.

Para las pruebas de CBR realizadas en las muestras estabilizadas con cemento, los autores indican que hubo un aumento de la resistencia con un aumento en el contenido de cemento y el

periodo de curado. También aumento cuando se usaron fibras de polipropileno o acero, y mostró un aumento adicional cuando estas dos fibras se usaron juntas. El aumento de CBR es mayor debido a la mayor resistencia a la penetración de las fibras presentes en las muestras.



6. Relación y comparación de métodos de estabilización con los distintos tipos de turbas

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, el suelo de turba es un suelo sobre el cual no es posible realizar una cimentación sin antes haber hecho un tratamiento previo al suelo natural. Entre todos los métodos para poder construir sobre un suelo de turba, el más económico y efectivo es la estabilización química con aglutinantes. Sin embargo, el éxito de una estabilización de una turba depende de algunos factores importantes, como el origen de los restos vegetales de la turba, el grado de descomposición de los restos vegetales, el contenido de fibras, el contenido de agua natural, la proporción de huecos, el pH, entre otros. Además, la eficacia de una buena estabilización también depende en gran medida de la reactividad del aglutinante utilizado para estabilizar y de los aditivos o rellenos que se utilicen.

Para medir la eficacia, como se mencionó anteriormente, la resistencia de la turba estabilizada a menudo se evalúa midiendo su resistencia a la compresión no confinada (UCS) debido a la baja permeabilidad del suelo y la alta rigidez, ya que proporcionan un medio relativamente rápido y barato para determinar la resistencia del suelo (Wong et al., 2011). Por tal motivo, de acuerdo con ASTM D4609 (guía estándar para evaluar la efectividad de la mezcla para la estabilización del suelo), la estabilización del suelo es efectiva si el UCS resultante es de al menos 345 kPa (Sariosseiri & Muhunthan 2009).

Además, un parámetro a tomar en cuenta para medir la eficacia de una estabilización es el pH de suelo estabilizado, debido a que los componentes más representativos de la materia orgánica del suelo son el ácido húmico y el ácido fúlvico. El ácido húmico tiende a reaccionar con el calcio liberado de la hidrólisis del cemento para formar calcio insoluble, lo que dificulta la cristalización del calcio, que es responsable del aumento de la resistencia del suelo del cemento (Chen y Wang, 2006). Por lo tanto, para que una estabilización de suelos orgánicos sea efectiva, el pH del suelo estabilizado debe exceder a 9 (Tremblay et al., 2002; ASTM D4609).

Según Dehghanbanadaki et al. (2013), la complejidad de las propiedades químicas y físicas de la turba con materiales estabilizadores es tal que no es posible predecir para un sitio dado qué estabilizador y dosificación producirán un rendimiento óptimo. Sin embargo, se ha visto a lo largo de este documento que la utilización del cemento como aglutinante para estabilizar turbas resulta efectivo. Además, la utilización de otros materiales en combinación con el cemento reduce la cantidad de este y aumenta la resistencia del suelo estabilizado.

Por ende, podemos analizar la estabilización de la turba dependiendo principalmente de su grado de descomposición, ya que la turba fibrosa, turba hémica y turba sáprica se comportan diferente debido a que tienen cambios químicos y biológicos a través del tiempo. Por ejemplo, los componentes orgánicos tras una mayor descomposición pueden cambiar las propiedades mecánicas de la turba, como la resistencia al cizallamiento, la compresibilidad y la conductividad hidráulica (Huat, 2004).

6.1. Estabilización en turba fibrosa (H₁ – H₄)

Entre los tres tipos de clasificación de un suelo de turba, la turba fibrosa es la más difícil de estabilizar debido propiamente a las fibras que contiene, además de los factores del ácido húmico y propiedades propias de la turba, ya que las fibras no siempre son sólidas y pueden estar llenas de agua y gas, dificultando así predecir el comportamiento de estas (Huat et al., 2014).

Tabla 6.1: Comparación de valores UCS y de pH en turba fibrosa

Referencia	Propiedades de la turba				Dosificación de aditivos y rellenos	Método de curado y periodo de curado	UCS (kPa)		pH	
	Clasif.	Contenido orgánico (%)	Contenido de agua (%)	pH			no perturbada	Estabilizada		
Ali et al. (2010)	H ₄	96.45	668.3	3.5	300 kg/m ³ (75% OPC + 25% EH) + 950 kg/m ³ AS	28 días de curado húmedo	4.5	178.6	9.97	
Saberian y Rahgozar (2016)	H ₂ -H ₄	85.5	446-593	4	5% OPC + 400 kg/m ³ WS + 10% AL	28 días de Curado húmedo con sobrecarga de 50kPa	6.3	609.5	8.5	
					10% OPC + 400 kg/m ³ WS + 10% AL			739		9.1
					15% OPC + 400 kg/m ³ WS + 10% AL			774.4		10.1
Kalantari y Prasad (2014)	H ₁ -H ₄	80.2	417	6.4	30% OPC	28 días Curado al aire	28.5	500	442	
					30% OPC	28 días Curado húmedo con sobrecarga de 10kPa		113		
					30% OPC	28 días Curado húmedo				

OPC, Cemento Portland ordinario; AS, Arena de sílice; AL, Astillas de llanta;

WS, Arena bien graduada; EH, Escoria de horno.

En la revisión documentaria, la Tabla 6.1 muestra tres estudios diferentes para estabilizar turba fibrosa las cuales se pueden decir que han sido exitosamente estabilizadas. Es clave resaltar que las dosificaciones han tomado un papel importante en la estabilización de la turba, así como el método de curado empleado para estabilizarla.

Ali et al. (2010) reemplazó una porción de cemento (OPC) por escoria de horno (EH) y agregó 950 kg/m³ de arena de sílice, logrando superar el pH necesario para que la turba se considere correctamente estabilizada. Sin embargo, en cuanto al UCS, este no alcanzó los 345 kPa que se requiere para que sea considerada una estabilización eficaz. Esto se debe posiblemente debido al método de curado empleado, ya que como se vio previamente en el capítulo 4, los efectos del curado tienen una influencia directa en la eficacia de una estabilización; y en el caso del estudio realizado

por Ali et al. (2010), utilizaron el curado húmedo, siendo este el que menos influencia en el aumento del UCS de la muestra. Esto se puede verificar en el estudio de Kalantari y Prasad (2014), donde la diferencia entre utilizar el método de curado húmedo y un curado al aire o curado húmedo con sobrecarga es notable, siendo el curado húmedo el menos efectivo para aumentar el UCS de las muestras.

Saberian y Rahgozar (2016) utilizaron cemento y agregaron arena bien graduada junto con astillas de llantas desechadas y se observó un incremento notable en la prueba UCS, así como un aumento en los niveles de pH de las muestras. Considerando que el uso de arena bien graduada con astillas de llantas y sin cemento, además de un método de curado húmedo con sobrecarga de 50kPa, el UCS de las muestras llegó a alcanzar 405 kPa, superando ya los 345kPa necesarios para considerarse efectivo. El agregar 5% de cemento aumentó considerablemente el UCS de las muestras; sin embargo, no se alcanzó el pH mínimo para considerarse como eficaz. El valor del pH no alcanzó el valor mínimo como se esperaba debido al poco contenido de cemento para neutralizar el ácido húmico dentro de la turba. Sin embargo, el utilizar una sobrecarga de 50kPa en el método de curado húmedo con sobrecarga y el uso de la arena bien graduada con astillas de llantas desechadas, hizo que el UCS de la muestra alcanzara niveles bastante superiores al mínimo para considerarse efectivamente estabilizado. Agregando un 5% más de cemento a las mismas cantidades de arena y astillas, y con el mismo método de curado, el UCS llega a alcanzar 739kPa de resistencia y un pH de 9.1.

Se podría decir que el uso únicamente de arena con astillas de llantas ya hace efectiva la estabilización de la turba. Sin embargo, es necesaria la utilización de cemento para mejorar otras propiedades geotécnicas de la turba que podrían afectar la estabilización en el tiempo. Además, al ser turbas fibrosas, como se vio en capítulos anteriores, el aplicar una sobrecarga hace que las fibras expulsen de su interior al gas o agua contenido en su interior, volviendo la estructura de la turba estabilizada más compacta. Skels et al. (2013) sostuvo que existe un efecto notable en la utilización de una sobrecarga en el método de curado húmedo en la etapa inicial de la estabilización, mientras que la eficacia de la estabilización en la etapa posterior estaba determinada por la tasa de dosificación del aglutinante. Además, la mezcla de la turba con cemento estabilizada es más homogénea cuando se aplica una sobrecarga, siendo este un método bastante efectivo para este tipo de turbas.

Por otro lado, en la comparación que realiza Kalantari y Prasad (2014) entre tres diferentes métodos de curado, el método de curado al aire resulta dar valores más altos del UCS en comparación con el curado con sobrecarga. Sin embargo, la sobrecarga de 10kPa equivale a 0.6m de arena, siendo esta esta menor en relación a los 50kPa de sobrecarga aplicados por Saberian y Rahgozar (2016). Esto indica que, a mayor sobrecarga aplicada a una estabilización, la mezcla de suelo-cemento se hace más homogénea y alcanza mayor resistencia.

6.2. Estabilización en turba hémica (H₅ – H₇)

En esta sección, en las cuatro primeras investigaciones, podremos comparar con mayor facilidad la estabilización de una turba hémica extraída en Kampung Jawa de Malasia peninsular, estabilizada con cemento, todas curadas al aire y diferentes tipos de aditivos, como se puede observar en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Comparación de valores UCS en turba hémica

Referencia	Propiedades de la turba				Dosificación de aditivos y rellenos	Método de curado y periodo de curado	UCS (kPa)	
	Clasif.	Contenido orgánico (%)	Contenido de agua (%)	pH			no perturbada	Estabilizada
Kalantari (2011)	H ₄ -H ₅	80.2	198-417	6.4	3.75% OPC + 1.25 % EH	Curado al aire	28.5	239.6
					11.25% OPC + 3.75 % EH			175
					22.5% OPC + 7.5 % EH			244.8
Kalantari et al. (2011)	H ₄ -H ₅	80.2	198-417	6.4	5% OPC + 10% HS	Curado al aire	28.5	320
					15% OPC + 10% HS			331
					25% OPC + 5% HS			380
Kalantari y Huat (2008)	H ₄ -H ₅	80.2	198-417	6.4	30% OPC	Curado al aire	28.5	480
					30% OPC + 0.15% FP			590
Kalantari et al. (2010)	H ₄ -H ₅	80.2	198-417	6.4	5% OPC + 0.15 % FP + 2% FA	Curado al aire	28.5	772.5
					15% OPC + 0.15 % FP + 2% FA			746
								90 días de curado
Wong et al. (2013b)	H ₅	92.5	668	3.5	270 kg/m ³ PCC + 30 kg/m ³ BS + 596 kg/m ³ AS	Curado húmedo		518
Wong et al. (2013a)	H ₆	96	668	3.51	270 kg/m ³ PCC + 30 kg/m ³ K + 596 kg/m ³ AS	Curado húmedo con sobrecarga de 100kPa		574
						28 días de curado		

OPC, cemento Portland Ordinario; PCC, cemento compuesto Portland;

EH, escoria de horno; HS, humo de sílice;

FP, fibras de polipropileno; FA, fibras de acero; BS, bentonita de sodio; AS, Arena de sílice;

K, kaolin

Entre los primeros cuatro estudios, por un lado, la estabilización realizada por Kalantari (2011) reemplazando escoria de horno (EH) por cemento, aumentó el UCS de las muestras estabilizadas con diferentes dosis, sin embargo, estas no fueron suficiente para alcanzar el UCS mínimo para

considerarse efectivamente estabilizada. Del mismo modo, en el estudio realizado por Kalantari et al. (2011), el agregar humo de sílice (HS) mejoró las propiedades de la turba de mejor forma que la escoria de alto horno. Sin embargo, solo la muestra con un 25% de cemento y 5% de humo de sílice lograron superar los 345kPa necesarios para considerarse una estabilización efectiva. Esto demuestra que agregar estos dos tipos de aditivos no son lo suficientemente efectivos para tratar este tipo de turbas, a menos que se busque solo alcanzar resistencias bajas.

Por otro lado, en el estudio de Kalantari y Huat (2008), la turba que fue estabilizada con 30% de cemento sin ningún aditivo aumentó el UCS de las muestras por encima del mínimo, llegando a 480kPa. Además, al agregar las fibras de polipropileno en una dosis de 0.15% a la misma cantidad de cemento, aumentó la resistencia en un 123%, siendo esta mejora bastante notable en comparación de utilizar cemento por sí solo. Del mismo modo, en el estudio de Kalantari et al. (2010), a una proporción menor de cemento, como se puede ver en la Tabla 6.2, se le agregó fibras de acero (FP) junto con fibras de polipropileno, superando por más de 180kPa a una estabilización de mayor contenido de cemento y solo utilizando fibras de polipropileno.

Para este tipo de turba hémica, la adición de aditivos no reactivos como las fibras de polipropileno y fibras de acero no solo aumentan su resistencia a la compresión considerablemente, sino que, del mismo modo, reducen la cantidad de cemento a utilizar, siendo este un factor importante a tomar en cuenta al momento de diseñar un proyecto de tratamiento de suelos de turba. Kalantari (2012) deduce que las fibras distribuidas aleatoriamente dentro de la turba estabilizada con cemento, limitan los planos potenciales de debilidad y también previenen la formación y desarrollo de grietas al cargar las muestras, y, por lo tanto, aumentan los valores de UCS. Es así que el autor declara que el cemento y las fibras se pueden utilizar eficazmente para mejorar la resistencia de la resistencia de la capa base para la construcción de pavimentos.

En los otros tipos de turbas hémicas, Wong et al. (2013a, b) utilizan cemento compuesto Portland como aglutinante principal en vez de cemento Portland ordinario. La diferencia química entre ambos se puede ver en la Tabla 5.10. Este tipo de cemento, según indica Wong et al. (2013a), tiene la incorporación de 2% de superplastificante pues este ayuda a dispersar el cemento en el suelo durante el proceso de hidratación de un suelo altamente orgánico.

Wong et al. (2013a, b) estabilizaron una misma turba extraída de una turbera en el estado de Selangor en Malasia. Como se puede observar en la Tabla 6.2, ambas turbas tienen propiedades similares, siendo lo único que los diferencia la profundidad de extracción de las muestras no alteradas, ya que, a mayor profundidad en una turbera, la descomposición es mayor (Huat et al., 2014).

Wong et al. (2013a, b), reemplaza parcialmente el cemento por dos aditivos puzolánicos, caolín y bentonita de sodio, los cuales resultan ser efectivos al momento de estabilizar este tipo de turba. Sin embargo, la bentonita de sodio resulta ser más eficaz, ya que el método de curado fue

húmedo sin ninguna sobrecarga, y el UCS de las muestras llegaron a superar ampliamente el UCS mínimo requerido. Esto también se puede deber a que el cemento utilizado no es OPC, sino uno diseñado para estabilizar suelos altamente orgánicos como la turba, ya que la adición del superplastificante ayuda a dispersar el cemento en el suelo durante el proceso de hidratación (Wong et al., 2013a)

6.3. Estabilización en turba sáprica (H₈– H₁₀)

La turba sáprica, como se mencionó anteriormente, es el suelo de turba con mayor descomposición, donde los restos vegetales son apenas reconocibles. Por lo general, la turba tiene una reacción ácida causada por la presencia de dióxido de carbono y ácido húmico resultante de la descomposición (Huat et al., 2014). Es decir, a mayor descomposición la turba tiene una mayor acidez, lo que dificulta su estabilización, como ya se había mencionado previamente.

Tabla 6.3: Comparación de valores UCS y pH en turba sáprica

Ref.	Propiedades de la turba				Dosificación de aditivos y rellenos	Método de curado y periodo de curado	UCS (kPa)		
	Clasif.	Contenido orgánico (%)	Contenido de agua (%)	pH			no perturbada	Estabilizada	pH
Wang et al. (2020)	H ₈ -H ₁₀	61.3	105.1	5.18	30% OPC + 40% AM + 10% Y	Curado en cámara húmeda de 90%	-	606	11
					30% OPC + 50% AM + 10% Y			747	11.2
					30% OPC + 60% AM + 10% Y	28 días de curado	879.1	11.5	
Skels et al. (2013)	H ₈ -H ₁₀	91	690	5.3	300 kg/m ³ OPC	Curado con sobrecarga de 18kPa 28 días de curado	-	403.3	-

OPC, cemento Portland ordinario; AM, arena manufacturada; Y, yeso

Como se explicó en el Capítulo 5.1, la inclusión de relleno no produce ninguna reacción química en la turba estabilizada con cemento, sin embargo, ayuda a mejorar la resistencia de la turba estabilizada al aumentar el número de partículas de suelo disponibles para que los aglutinantes y aditivos se unan y formen una estructura de suelo más compacta. Wang et al. (2020) realiza una investigación experimental para comprobar los efectos de arena manufacturada en la estabilización de un suelo de turba sáprica con cemento. En la Tabla 6.3 podemos ver los resultados más efectivos en cuanto uso de cemento y aumento de UCS, así como el aumento del pH de las muestras estabilizadas.

Skels et al. (2013), utilizaron únicamente cemento Portland ordinario con un curado húmedo con sobrecarga. En su estudio, realizan una comparación para observar la influencia de diferentes

sobrecargas con diferentes dosis de cemento. En la Tabla 6.3, se observa el resultado más eficaz de las muestras tratadas.

Ambos estudios mostrados lograron estabilizar eficazmente un suelo de turba sáprica. Es importante resaltar la influencia del relleno para mejorar las propiedades de la turba, así como un curado con sobrecarga. Sin embargo, una buena dosificación de cemento es sumamente esencial para poder neutralizar el ácido húmico presente en un suelo de turba tan ácido como este.

6.4. Discusión

Para este trabajo se han considerado algunas variables al momento de analizar los métodos de estabilización en suelos de turba. Una importante fue el grado de descomposición de la turba, ya que, a mayor grado de descomposición, la acidez de esta es mayor, dificultando la estabilización. Por tal motivo, en el presente capítulo separamos la eficacia de una estabilización según su clasificación por von Post, que clasifica a las turbas según su grado de descomposición.

Entre los tres tipos de turbas vistas, se ha podido observar que todas pueden ser correctamente estabilizadas utilizando solo cemento, sin embargo, la utilización aditivos químicos y no químicos, así como rellenos como la arena bien graduada, ayudan a mejorar las propiedades de las turbas, reduciendo el uso del cemento. Esta reducción del uso de cemento en proyectos de estabilización es sustancial, ya que no solo reduce económicamente un proyecto, sino que hace al proyecto sustentable, pues la producción de cemento es uno de los grandes generadores de CO₂ en el mundo.

Además, se ha notado que el método de curado a utilizar es importante al momento de estabilizar un suelo orgánico, pues este influye en la ganancia de resistencia de las muestras, así como lo haría *in situ*. Esto se debe a que la elección de un método de curado refleja el método de estabilización que se haría en capo, como se vio en el Capítulo 4.

7. Conclusiones y recomendaciones

- La turba es un suelo extremadamente blando y húmedo, y con un gran contenido de materia orgánica de origen vegetal, por lo cual realizar alguna obra de ingeniería es sumamente difícil si no se hace algún tratamiento a este suelo. Además, las condiciones de una turbera son variables, pues el nivel freático varía constantemente dependiendo del clima, y la descomposición de la materia orgánica es variable a diferentes profundidades. Es así como, entre los métodos para tratar suelos blandos, la estabilización química ha resultado ser la más efectiva para tratar este tipo de suelos.
- Entre los diferentes aglutinantes estudiados por diferentes autores, el cemento ha demostrado ser el más eficaz para realizar esta labor, ya sea en estabilizaciones profundas, estabilización en masa, o una estabilización combinada, como se pudo ver en la Figura 3.4. El cemento forma materiales aglutinantes con el agua de la turba, reduciendo así el contenido de agua de este; además también produce reacciones puzolánicas con las partículas de arcilla presentes en la turba. Sin embargo, estas reacciones no son tan predominantes en la turba debido a que la turba presenta poco material particulado y el cemento produce pocas reacciones puzolánicas.
- Así mismo, la turba tiene entre sus componentes sustancias retardantes como ácidos húmicos, los cuales reaccionan con el hidróxido de calcio, lo que retarda la cristalización del calcio e impide el aumento de la resistencia de la mezcla suelo-cemento de la turba. Es así, que muchos concuerdan en que, para neutralizar estos ácidos, se debe de utilizar una dosificación mínima de cemento para neutralizar dichos ácidos, a lo que se le conoce como el “umbral”. No obstante, muchas veces superar este umbral para que la estabilización sea efectiva puede resultar antieconómica en grandes proyectos de ingeniería, ya que se necesitaría enormes cantidades de cemento. Es preciso agregar, además, que la producción de cemento es uno de los grandes generadores de CO₂ en el planeta.
- Por razones como las mencionadas, múltiples autores han buscado reemplazar parcialmente el cemento por otros aditivos químicos o no químicos para reducir el uso de cemento, encontrándose con que, algunos aditivos no solo ayudan a reducir el contenido de cemento para una mejor resistencia, sino que, en combinación, pueden resultar ser mucho más efectivos que la utilización de solo cemento en grandes cantidades.
- Además, para realizar una correcta estabilización es importante recalcar que el método de curado de las muestras estabilizadas es importante, ya que estas reflejan las condiciones que se presentan en campo. Según se vio, la estabilización al aire sin inclusión de agua es la más efectiva, pues el proceso de hidratación del cemento reduce la gran cantidad de agua que tiene un suelo como la turba. Del mismo modo, la estabilización húmeda con sobrecarga es otro método bastante efectivo que utilizar, pues esta exprime las burbujas de aire y agua dentro de la turba, volviendo la mezcla más homogénea y compacta. Es así como, para ambos casos mencionados, se tendría

que realizar evaluaciones de las condiciones *in situ*, viendo la disponibilidad de materiales y herramientas para poder aplicar alguno de estos dos métodos.

- El uso de rellenos naturales también juega un papel importante en la estabilización. Según lo estudiado, la arena bien graduada, ya sea en sus variantes de arena de sílice o arena manufacturada, aportan una gran resistencia a la estabilización de suelos de turba, en comparación a la arena mal graduada o a las gravas. A pesar de que no produce ninguna reacción química, aporta una gran cantidad de partículas de suelo para que los diferentes aglutinantes se puedan enlazar y formar una estructura más densa y resistente. Así mismo, su utilización también ayuda a reducir la cantidad de cemento a utilizar.
- Entre los aditivos químicos que más resaltan se encuentran los aditivos puzolánicos, como la bentonita de sodio y el yeso, los cuales al ser utilizados pueden llegar a reducir la cantidad de cemento a utilizar y aportar gran resistencia a la estabilización. Otros aditivos químicos pueden ser utilizados si lo que se busca son estabilizaciones que no soporten mucha carga.
- Entre los aditivos no reactivos encontramos a las fibras de polipropileno y a las fibras de acero, las cuales al ser utilizadas de forma separada aumentan la resistencia de las muestras a comparación de solo utilizar cemento. Además, si son utilizadas juntas, el aumento de la resistencia es mucho más alto, pues las fibras distribuidas aleatoriamente dentro de la turba estabilizada con cemento limitan los planos potenciales de debilidad y también previenen la formación y desarrollo de grietas al cargar las muestras. Un material sostenible que también ayuda con mejorar la resistencia de turbas estabilizadas con cemento son las astillas de llantas desechadas pues según la Tabla 5.4, solo un 10% causa un aumento considerable del UCS. Este es un material al cual se le tendría que prestar más atención ya que su simple uso ayuda con el medio ambiente a reducir las cantidades de llantas desechadas alrededor del mundo.
- Según la guía EuroSoilStab (2002), las propiedades químicas y físicas de la turba con materiales estabilizadores es tal que no es posible predecir para un sitio dado qué estabilizador y dosificación producirán un rendimiento óptimo. Sin embargo, como se ha ido viendo, existen diferentes aditivos químicos y no químicos que podrían entrar en consideración para poder estabilizar una turba junto con el cemento. Del mismo modo, la arena bien graduada es un material importante que no se debería descartar del todo al momento de realizar una estabilización.

8. Bibliografia

- ASTM. (2000). *Annual Book of ASTM Standards, Section Four: Construction*. American Society of Testing Materials, USA.
- Axelsson, K., Johansson, S.-E., & Andersson, R. (2002). *Stabilization of Organic Soils by Cement and Pozzolanic Reactions*. Svensk Djupstabilisering: Swedish Deep Stabilization Research Centre.
- Chen, H., & Wang, Q. (2006). The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement. *Bull Eng Geol Env*, 445-448.
- Dehghanbanadaki, A., Ahmad, K., & Ali, N. (2013). Influence of natural fillers on shear strength of cement treated peat. *Gradjevinar*, 633-640.
- Dehghanbanadaki, A., Arefnia, A. K., Ahmad, K., Motamedi, S., & Hashim, R. (2017). Evaluating the compression index of fibrous peat treated with different binders. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 575-586.
- den Haan, E., & El Amir, L. (1994). A simple formula for final settlement of surface loads. *Conference on Advances in Understanding and Modelling the Mechanical Behaviour of Peat* (págs. 35-48). Balkema.
- Duraisamy, Y., Huat, B. B., & Muniandy, R. (2009). Compressibility behavior of fibrous peat reinforced with cement columns. *Geotechnical and Geological Engineering*, 619-629.
- EuroSoilStab. (2002). *Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils: Design guide soft soil stabilization*. Industrial & Materials Technologies Program (Brite-EuRam III), European Commission.
- Hebib, S., & Farrell, E. R. (2003). Some experiences on the stabilization of Irish peats. *Canadian Geotechnical Journal*, 107-120.
- Huat, B. (2004). *Organic and Peat Soils Engineering*. Serdang.
- Huat, B., Prasad, A., Asadi, A., & Kazemian, S. (2014). *Geotechnics of Organic Soils and Peat*.
- Hwang, J., Humphrey, A., Bobet, A., & Santagata, M. C. (2004). *Stabilization and Improvement of Organic Soils*.
- Janz, M., & Johansson, S.-E. (2002). The Function of Different Binding Agents in Deep Stabilization. *Linköping (Sweden): 9th Report of*.
- Kalantari, B. (2011). Strength evaluation of air cured, cement treated peat with blast furnace slag. *Geomechanics and Engineering*, 207-218.
- Kalantari, B. (2012). Use of cement, polypropylene fibers and optimum moisture content values to strengthen peat. *International Journal of the Physical Sciences*.
- Kalantari, B., & Huat, B. B. (2008). Peat soil stabilization, using Ordinary Portland Cement, Polypropylene fibers, and Air Curing Technique. *Electronic Journal of Geotechnical*

Engineering.

- Kalantari, B., & Prasad, A. (2014). A study of the effect of various curing techniques on the strength of stabilized peat. *Transportation Geotechnics*, 119-128.
- Kalantari, B., Prasad, A., & Huat, B. B. (2010). Peat stabilization using cement, polypropylene and steel fibres. *Geomechanics and Engineering*, 321-335.
- Kalantari, B., Prasad, A., & Huat, B. B. (2011). Stabilising peat soil with cement and silica fume. *Geotechnical Engineering*, 33-39.
- Kazemian, S. (2017). Organic Soils and Peats. *Encyclopedia of Engineering Geology*.
- Kazemian, S., Huat, B. B., Prasad, A., & Barghchi, M. (2011 a). Effect of peat media on stabilization of peat by traditional binders. *International Journal of the Physical Sciences*, 476-481.
- Kazemian, S., Huat, B. B., Prasad, A., & Barghchi, M. (2011 c). A state of art review of peat: Geotechnical engineering perspective. *International Journal of Physical Sciences*, 1974-1981.
- Kazemian, S., Prasad, A., Huat, B. B., & Bazaz, J. B. (2011 b). Effect of aggressive pH media on peat treated by cement and sodium silicate grout. *Jorunal Cent. South Univ. Technol.*, 840-847.
- Lähteenoja, O., Reátegui, Y. R., Räsänen, M., Torres, D. D., Oinonen, M., & Page, S. (2018). The large Amazonian peatland carbon sink in the subsiding Pastaza-Marañón foreland basin, Peru. *Global Change Biology*, 164-178.
- Mohd Zambri, N., & Md Ghazaly, Z. (2018). Peat Soil Stabilization using Lime and Cement. *E3S Web of Conferences*, 1-7.
- Munro, R. (2005). *Dealing With Bearing Capacity Problems on Low Volume Roads Constructed on Peat*. ROADDEX II Northern Periphery.
- Rahmi, A., Taib, S. N., & Sahdi, F. (2018). Investigation of the Application of Various Water Additive Ratios on Unconfined Compressive Strength of Cement-Stabilized Amorphous Peat at Different Natural Moisture Contents. *Advances in Civil Engineering*.
- Saberian, M., & Rahgozar, M. A. (2016a). Geotechnical properties of peat soil stabilised with shredded waste tyre chips. *Mires and Peat*, 1-12.
- Saberian, M., & Rahgozar, M. A. (2016b). Geotechnical properties of peat soil stabilised with shredded waste tyre chips in combination with gypsum, lime or cement. *Mires and Peat*, 1-16.
- Sariosseiri Farid, M. B. (2009). Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils. *Engineering Geology*, 119-125.
- Skels, P., Bondars, K., & Korjakins, A. (2013). Unconfined compressive strength properties of cement stabilized peat. *Civil Engineering '13, 4th International Scientific Conference*, (págs. 202-206). Jelgava.

- Tremblay, H., Duchesne, J., Locat, J., & Leroueil, S. (2002). Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. *Canadian Geotechnical Journal*, 535-546.
- von Post, L. (1922). Sveriges geologiska undersoknings torvinventering och nagre av dess hittills vunna resultat. 1-24.
- Wang, J., Li, M., Wang, Z., & Shen, L. (2020). The benefits of using manufactured sand with cement for peat stabilisation: An experimental investigation of physico-chemical and mechanical properties of stabilised peat. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 4441-4460.
- Wong, L. S., Hashim, R., & Ali, F. H. (2011). Unconfined compressive strength characteristics of stabilized peat. *Scientific Research and Essays*, 1915-1921.
- Wong, L. S., Hashim, R., & Ali, F. H. (2013 a). Improved strength and reduced permeability of stabilized peat : Focus on application of kaolin as a pozzolanic additive. *Construction and Building Materials*, 783-792.
- Wong, L. S., Hashim, R., & Ali, F. H. (2013 b). Utilization of sodium bentonite to maximize the filler and pozzolanic effects of stabilized peat. *Engineering Geology*, 56-66.
- Zulkifley, M., Ng, T. F., Raj, J. K., Hashim, R., Bakar, A. F., Paramanthan, S., & Ashraf, M. A. (2014). A review of the stabilization of tropical lowland peats. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 733-746.

Anexo A: Tablas

Escala de von Post	Descripción
H1	Turba completamente sin descomponer que, al exprimirse, libera agua casi transparente. La planta sigue siendo fácilmente identificable. No hay material amorfo presente.
H2	Turba casi completamente sin descomponer que, al exprimirse, libera agua clara o amarillenta. La planta sigue siendo fácilmente identificable. No hay material amorfo presente.
H3	Turba muy ligeramente descompuesta que, al exprimirse, libera agua parda muy fangosa, pero de la que no pasa turba entre los dedos. La planta sigue siendo identificable y no hay material amorfo presente.
H4	Turba ligeramente descompuesta que, al exprimirse, libera agua oscura muy turbia. No se pasa turba entre los dedos, pero los restos de la planta están ligeramente pastosos y han perdido algunas de sus características identificables.
H5	Turba ligeramente descompuesta que, al exprimirse, libera agua oscura muy turbia. No se pasa turba entre los dedos, pero los restos de la planta están ligeramente pastosos y han perdido algunas de sus características identificables.
H6	Turba moderadamente descompuesta que tiene una estructura vegetal muy indistinta. Cuando se aprieta, aproximadamente un tercio de la turba se escapa entre los dedos. La estructura más claramente que antes de apretar.
H7	Turba muy descompuesta. Contiene mucho material amorfo con una estructura vegetal muy débilmente reconocible. Cuando se aprieta, aproximadamente la mitad de la turba se escapa entre los dedos. El agua, si se libera, es muy oscura y casi pastosa.
H8	Turba muy descompuesta con gran cantidad de material amorfo con estructura vegetal muy indistinta. Cuando se exprime, aproximadamente dos tercios de la turba se escapa entre los dedos. Puede desprenderse una pequeña cantidad de agua pastosa. El material vegetal que queda en la mano está formado por residuos como raíces y fibras que resisten la descomposición.
H9	Turba prácticamente totalmente descompuesta en la que apenas hay una estructura vegetal reconocible. Cuando se exprime es una pasta bastante uniforme.
H10	Turba completamente descompuesta sin estructura vegetal perceptible. Cuando se aprieta, toda la turba húmeda se escapa entre los dedos.