



MANUAL

ESTABILIZACIÓN DE SUELO

PARA PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL Y URBANIZACIÓN

Guatemala, 2023



ESTRUCTURACIÓN

ESTRUCTURACIÓN	2
PRESENTACIÓN	4
INTRODUCCIÓN	6
CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS EN PROYECTOS DE INGENIERÍA	7
Definición de suelo	7
Clasificación de suelos	8
Tipos de suelos	8
Grava	9
Arena	9
Limo	10
Arcilla	10
Estudios de identificación	11
Estudio de granulometría	11
Estudio de límites de Atterberg	16
Estudio de sulfatos solubles	17
Estudio de materia orgánica	18
Estudios de comportamiento	19
Eades y Grim (pH).....	19
Ensayo de compactación proctor estándar y modificado.....	20
Ensayo Relación Soporte California (CBR)	22
Ensayo de compresión axial no confinada (probetas a compresión)	23
TIPOS DE ESTABILIZACIÓN	24
Estabilización mecánica	25
Beneficios físicos de la estabilización mecánica	26
Ventajas de la estabilización mecánica	27
Desventajas de la estabilización mecánica	28
Recomendaciones de estabilizar por el método mecánico.....	28
Estabilización física	29

Materiales estabilizadores físicos.....	30
Beneficios de la estabilización física	30
Ventajas de la estabilización física	31
Desventajas de la estabilización física	32
Recomendaciones para la estabilización física	33
Estabilización química	34
Ventajas de la estabilización química	35
Desventajas de la estabilización química	37
Recomendaciones de la estabilización química	38
Estabilización de suelos con Cemento Hidráulico	
Progresos UGC	39
Beneficios de estabilización de suelos con Cemento Hidráulico Progreso UGC	42
Estabilización de suelos con Conglomerante Hidráulico Terraforce.....	43
Beneficios de la estabilización de suelos con Terraforce.....	44
Estabilización de suelos con Hidrovial+	46
Proceso de estabilización de suelos con Hidrovial+.....	49
Beneficios de la estabilización de suelos con Hidróxido de Calcio Hidrovial+	50
Dosificación de material	52
PROCESO TÉCNICO DE ESTABILIZACIÓN	53
Escarificación del suelo	54
Pulverización del suelo	55
Colocación de material estabilizante	56
Homogenización de suelo y el material estabilizante	57
Aplicación de agua	58
Maduración	58
Mezcla y pulverización	58
Compactación.....	59
Curado.....	60
EJEMPLO DE PROYECTOS EJECUTADOS	61
BIBLIOGRAFÍA	64





PRESENTACIÓN

Cementos Progreso, Horcalba y Soluciones Viales, presentan esta guía que para que pueda ser utilizada en prácticas de **estabilización** y mejoramiento de suelos naturales, **estabilización** de subrasantes, bases y sub bases de pavimentos rígidos y flexibles, explanadas y plataformas.

En esta guía podrá encontrarse procedimientos necesarios que asistan en la toma de decisiones con criterios de calidad desde la selección del material estabilizante, procedimientos básicos y el equipo necesario, asimismo, determinar la dosificación adecuada de material estabilizante según los resultados que se obtengan previamente en estudio de suelos.

Los suelos que se analizan para la estabilización son los clasificados por la American Association of State Highway and Transportation Official –AASHTO- y por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

El **mejoramiento y estabilización de suelos** con Cemento Hidráulico, Hidróxido de Calcio Hidrovial+ y Conglomerante Hidráulico Terraforte, disminuyen o merman la plasticidad, modifican las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, suprimiendo los cambios volumétricos por expansión y contracción, aumentando la resistencia al corte, a la compresión y la estabilidad. Utilizar el suelo natural estabilizado presente en un proyecto, puede representar ahorro económico y optimización del tiempo de ejecución al disminuir el proceso de acarreo de material de sustitución extraído de una cantera o un banco de material, a la vez que disminuye la explotación de canteras o banco de materiales, conservando la fauna, la flora y reduciendo el impacto ambiental.

Es importante recalcar que para garantizar que la estabilización sea la adecuada, es necesario seguir los lineamientos pre establecidos en este documento y que el control de calidad sea el adecuado, en el diseño y la ejecución del proyecto.

El presente manual deberá servir única y exclusivamente como una guía para asistir al usuario en la toma de decisiones, sin embargo, será decisión del usuario del manual el utilizarlo y/o hacer uso de las recomendaciones y procedimientos en él contenidos. En tal virtud, ni Cementos Progreso, S.A. ni cualquier persona o entidad directa o indirectamente relacionados con ellas asume responsabilidad alguna ni será responsable, ni deberá responder ante cualquier acción judicial o extrajudicial (directa o indirecta) de cualquier tipo originada por, o vinculada con el uso del presente manual y su contenido y cualquier consecuencia que del uso del mismo se deriven (directa o indirectamente). Asimismo, tampoco se ofrece garantía de algún tipo de resultado específico ni se asume responsabilidad alguna por cualquier interpretación distinta, errónea o falta de comprensión de la información en él incluida, ni se asume responsabilidad por cualquier tipo de daños y/o perjuicios reales, directos o indirectos, invocados por quienes aleguen haber utilizado el manual o haber sido inducidos a tomar decisiones al consultar el manual.

El usuario del presente manual asume la completa responsabilidad del uso del presente manual e/o implementación de las recomendaciones y procedimientos en él contenidos y desde ya libera a Cementos Progreso, S.A., y a cualquier persona o entidad directa o indirectamente relacionadas con ellas y se obliga a mantener a dichas personas y entidades libres e indemnes de cualquier responsabilidad por el uso del presente manual e implementación de lo que en él se presenta.



INTRODUCCIÓN

Como se evidencia en proyectos de infraestructura vial, las propiedades en los suelos que no reúnen las condiciones adecuadas son un problema común. Estas propiedades, al ser sometidas a cargas externas presentan problemas de contracción y expansión que pueden ser derivados por presencia de humedad, plasticidad, granulometría, etc.

Las buenas prácticas en la estabilización de suelos son procesos buscan mejorar las características físicas y mecánicas de un suelo natural para que éste pueda aumentar la resistencia ante las cargas externas a las que será sometido, de manera que disminuya los cambios volumétricos de contracción y de expansión debido a la retención de humedad del suelo en su interior como anteriormente se ha mencionado.

En esta guía reforzamos que la calidad de un proceso de estabilización de suelos, inicia desde la evaluación del suelo natural ubicado en el área de un proyecto, la elaboración de calicatas para la extracción de muestras de suelo, elaboración de ensayos técnicos de identificación y comportamiento de suelos, dosificación y equipo en la ejecución de la obra.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS EN PROYECTOS DE INGENIERÍA



DEFINICIÓN DE SUELO

Según el libro Mecánica de Suelos de Juárez Badillo y Rico Rodríguez, un suelo es todo material con características terrosas, que puede ser un relleno de desperdicio, areniscas parcialmente cementadas y rocas sedimentarias clásticas de grano muy fino. Es decir, los suelos en ingeniería son todos los materiales naturales que se encuentran presentes en las distintas áreas geográficas y que forman parte de la base natural de cualquier proyecto de infraestructura (estructuras verticales y estructuras horizontales).

Estos materiales pueden clasificarse en dos tipos:

- a) Rocas
- b) Suelos

Según el documento de Mecánica de Suelos del Centro Universitario de Occidente, Universidad de San Carlos de Guatemala (2006), las **rocas** son un agregado natural mineral de grano grueso que poseen cohesión alta y que para separarlos es necesario emplear métodos mecánicos, y los suelos son agregados naturales de granos minerales, con o sin componentes orgánicos, que pueden separarse por medios mecánicos comunes.



CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Previo a realizar una obra de infraestructura vertical u horizontal, es obligatorio tener conocimiento del tipo de suelo presente en el área donde se realizará la ejecución del proyecto.

Los suelos que debe tratar todo Ingeniero Civil son suelos de grano grueso y de grano fino. En algunos casos puede existir una combinación de estos pueden estar presentes otros materiales de tipo orgánico y sulfatos solubles.

Según los estudios de suelos que el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso (CID) que ha desarrollado con diferentes empresas constructoras de Guatemala y Centro América, se ha

encontrado combinación de suelos granulares y finos, que poseen materia orgánica según sea la procedencia geográfica.

Cuando existe una mezcla de suelos, el nombre del suelo estará dado principalmente por el tipo de material predominante en la mezcla y el material en menos proporción será el adjetivo, ejemplo: limo arcilloso, significa que el material predominante es el limo y el que contiene menos proporción en la mezcla es la arcilla.

TIPOS DE SUELOS

Grava

Está formada por fragmentos de roca que, al ser sometidas a ensayos de laboratorio y filtrados por los tamices, el cien por ciento pasa por el tamiz de 75 mm (3") y queda retenidas sobre un tamiz de 4.75 mm (No.4). Este material puede clasificarse de la forma siguiente:

Grava gruesa: pasa tamiz 75 mm (3") y queda retenida sobre tamiz de 19 mm (3/4").

Grava fina: pasa tamiz de 19 mm (3/4") y queda retenida sobre el tamiz de 4.75 mm (No.4).



Figura 1. Suelo tipo granular

Fuente: Centro Tecnológico, Cementos Progreso. (2023).

Arena

Son fragmentos o partículas de roca que pasan el tamiz 4.75 mm (No.4) y quedan retenidas sobre el tamiz de 75 μ m (No.200). Este material se puede subdividir de la forma siguiente:

Arena gruesa: pasa el tamiz de 4.75mm (No.4) y queda retenida sobre tamiz de 2.00mm (No.10).

Arena Media: pasa el tamiz de 2.00mm (No.10) y queda retenida sobre el tamiz de 425 μ m (No. 40).

Arena fina: pasa el tamiz de 425 μ m (No.40) y queda retenida sobre el tamiz de 75 μ m (No. 200).



Figura 2. Suelo tipo arenoso

Fuente: Construcción y Arquitectura. (2016).

Figura 3. Suelo tipo limoso



Fuente: Centro Tecnológico, Cementos Progreso. (2023).

Figura 4. Suelo tipo arcilloso



Fuente: Centro Tecnológico, Cementos Progreso. (2023).

Limo

Este tipo de suelo es clasificado como suelo fino, debido que pasa el tamiz de 75 μm (No. 200), es la porción fina de un suelo con índice plástico menor que 4%, exhibe poca o ninguna resistencia cuando se seca al aire.

Arcilla

Este tipo de suelo es clasificado como suelo fino, debido que pasa el tamiz de 75 μm (No. 200), tiene consistencia de plasticidad, cuando está sometido a humedad, pero que muestra considerable resistencia cuando se seca al aire.

La arcilla es un suelo de grano fino, o la porción fina de un suelo con un índice de plasticidad igual o mayor que 4. Estos suelos se pueden distinguir por poseer color café oscuro o negro y se puede tener la presunción en que el suelo contenga partículas orgánicas si el color del suelo varía entre el café oscuro, gris oscuro, negro.

ESTUDIOS DE IDENTIFICACIÓN

Los estudios de identificación de suelos, son los que se practicarán a una muestra representativa de material proveniente de un proyecto, con el objetivo de conocer sus propiedades naturales, como la granulometría, los índices de consistencia y las propiedades de mineralogía y así evaluar el método para mejorar sus propiedades convirtiendo el suelo en material adecuado para soportar mayor cantidad de carga y esfuerzos aplicados por una estructura externa al suelo. Los estudios de identificación se describen a continuación:

Estudio de Granulometría

Los análisis se realizan bajo las normas siguientes: **AASHTO T 88, AASHTO T 311, ASTM D 6913, ASTM D 7928.**

Como parte al estudio de suelos, la granulometría brindará la información complementaria para conocer qué tipo de suelo se ha encontrado. En la tabla siguiente se presenta un resumen del porcentaje que pasa los suelos por los tamices al ser sometidos a ensayos de laboratorio.

Tabla 1. Tamaño granular de los suelos

Límites de los tamaños de los componentes de suelo

No.	Suelo	mm	No. Tamiz
1	Grava	> 4.75	No. 4
2	Arena gruesa	$4.75 \leq 2.00$	No.4 $\leq$ No.10
3	Arena media	$2.00 \leq 0.425$	No. 10 $\leq$ No. 40
4	Arena fina	$0.425 \leq 0.075$	No. 40 $\leq$ No. 200
5	Limo y arcillas	< 0.075	$<$ No. 200

Fuente: Cementos Progreso. Tol, L. (2023)..

De acuerdo a la reacción de los suelos sometidos a esfuerzos y temperatura, se podrá identificar en campo el tipo de suelo que tenemos presente, como muestra la tabla siguiente:

Tabla 2. Característica de un suelo en campo

No.	Tipo de suelo	de Resistencia en estado seco	Dilatación	Tenacidad
1	Limo arenoso	De ninguna a muy baja	Rápida	De débil a baja
2	Limo	De muy baja a baja	Rápida	De débil a baja
3	Limo arcilloso	De baja a media	De rápida a lenta	Media
4	Arcilla arenosa	De baja a alta	De lenta a ninguna	Media
5	Arcilla limosa	De media a alta	De lenta a ninguna	Media
6	Arcilla	De alta a muy alta	Ninguna	Alta
7	Limo orgánico	De baja a media	Lenta	De débil a baja
8	Arcilla orgánica	De media a muy alta	Ninguna	Alta

Fuente: Cementos Progreso. Tol, L. (2023).

La variedad en el tamaño de las partículas del suelo casi es ilimitada; por simple inspección, los granos de mayor tamaño son los que se pueden ver con gran facilidad, mientras que los más finos son tan pequeños que no se puede apreciar con un microscopio corriente.

El objetivo del análisis granulométrico es determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano presentes en una masa de suelo, es recomendable que para que los resultados sean satisfactorios, la muestra debe ser representativa. Con los resultados de este análisis podemos tener una idea previa del comportamiento del suelo y si puede ser apto para uso en proyectos de ingeniería.

El análisis granulométrico por tamizado consiste en elaborar la representación gráfica del diámetro o tamaño de las partículas presente en la muestra de suelo que se esté analizando, esta representación gráfica es la que llamamos **curva granulométrica**. El material analizado, previamente seco, se hace pasar por varios tamices con mallas que tienen diferentes aberturas ya establecidas por la norma ASTM C 136, el diámetro de las aberturas de los tamices inicia con 125 mm y finaliza con el diámetro 0.075 mm, conocido como tamiz No.200.

El procedimiento básico para analizar una muestra de suelo por el método del tamizado es el siguiente:

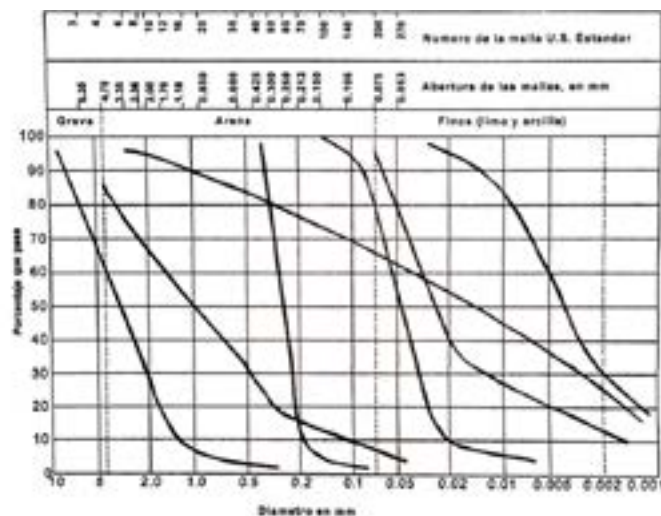
1. Extracción de muestra de suelo (libre de contaminantes).
2. Secado de la muestra de suelo.
3. Disgregación de la muestra de suelo ya habiendo sido secada.
4. Pesar la muestra representativa del suelo.
5. Clasificación del diámetro de suelo por medio del tamizado, siendo los tamices siguientes:

Tabla 3. Abertura de tamices

No. Tamiz	Abertura (pulgada)	Abertura (mm)
1	2"	50.00
2	1 1/2"	37.50
3	1"	25.00
4	3/4"	19.00
5	3/8"	9.50
6	No. 4	4.75
7	No. 10	2.00
8	No. 40	0.425
9	No. 200	0.075

Fuente: Normativa American Association Standards Highway Transportation Officials, AASHTO E 11.

Figura 5. Curvas de distribución granulométrica de los suelos



Fuente: Centro Universitario de Occidente, Universidad de San Carlos de Guatemala. Grijalva, C. (2006).

Tabla 4. Clasificación de los suelos

Tipo de suelo según porcentaje (%) que pasa en los tamices

Tipo de Suelo	(%) Que pasa
1 Gravas	2" (50.00mm) < % < 4 (4.75mm)
2 Arenas	4 (4.75 mm) < % < 200 (0.075mm)
3 Finos (limos y/o arcillas)	% < 200 (0.075mm)

Fuente: Cementos Progreso. Tol, L. (2023).

Los suelos que pasan el tamiz No. 200 según la tabla No.4, son considerados suelos finos. Este tipo de suelo puede clasificarse según el límite líquido (LL) e índice de plasticidad (IP) que posea y relacionándolos en la carta de plasticidad.

Es importante interpretar correctamente la carta de plasticidad, ubicando el límite líquido en el eje de las abscisas y el índice de plasticidad en el eje de las ordenadas, como se muestra en la tabla No.4 Clasificación de Suelos.

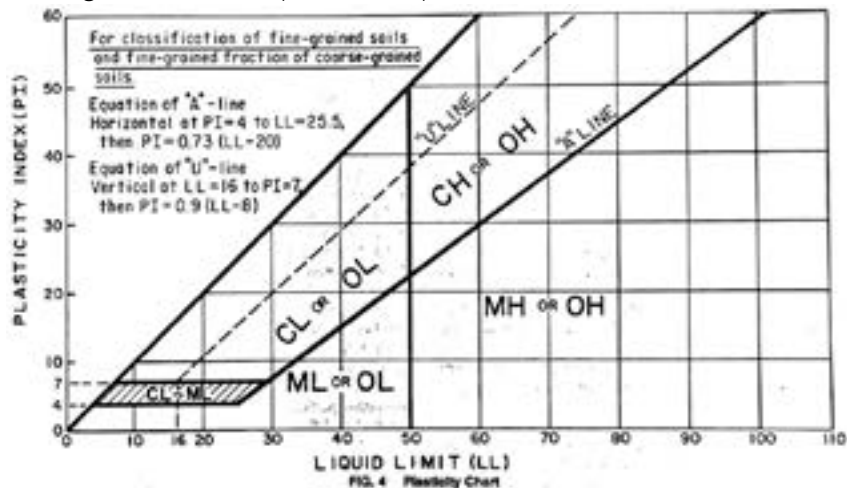
La recta vertical formada por el 50% del límite líquido del suelo, diferencia a los suelos de baja compresibilidad (L) y de alta compresibilidad (H), y de acuerdo con la relación que exista entre (LL) y (IP) el suelo podrá ser considerado como limo (M) o arcilla (C), respecto a la ubicación con la recta $IP = 0.73(LL - 0.2)$.

Si la relación existente entre el (LL) y (IP) está por encima de la recta IPA el suelo es (C) y si se encuentra por debajo de la recta IPA el suelo es (M). Por lo cual, los suelos finos se pueden clasificar en cuatro tipos, siendo los siguientes:

1. CL = arcilla de baja compresibilidad
2. CH = arcilla de alta compresibilidad
3. ML = limo de baja compresibilidad
4. MH = limo de alta compresibilidad

El rango existente por encima de la línea PI entre (4% y 7%) el suelo se clasifica como (CL) y (ML). Existe una línea formada por $PI = 0.9(LL - 0.08)$ el cual indica el límite superior del (IP) en conjunto con el (LI) y no se encuentran suelos que puedan tener esta combinación. La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad para clasificar un suelo fino se presenta en la figura siguiente:

Figura 6. Carta de plasticidad para clasificación de suelos



Fuente: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), (Imagen). Annual Book Of ASTM Standard, Volume 04.08, (2010).

Una vez clasificado el suelo de acuerdo a lo establecido en la carta de plasticidad, se podrá agrupar dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S), que se muestra en la Tabla No. 5. Asimismo, de acuerdo a la granulometría, límite líquido e índice de plasticidad los suelos se pueden clasificar en grupos A-1, A-2, A-3,

A-4, A-5, A-6 y A-7, el cual fue adoptado por la American Society for Testing and Materials "ASTM D 2487" y que se presenta en la Tabla No. 6 Clasificación de suelos de la American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO M 145.

Tabla 5. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS

Divisiones Mayores			Símbolo de Grupo		Nombres Típicos	Criterios de clasificación para suelos granulares		
Suelos de grano grueso Si menos del 50% del material pasa el tamiz No. 200	Gravas (Si menos del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4)	Gravas limpias (pocos o ningún fino)	GW		Gravas bien gradadas, mezclas gravosas, pocos o ningún fino	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = 1 < D_{30}/D_{10} \times D_{60} < 3$		
			GP		Gravas pobremente gradadas, mezclas grava-arena, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para GW		
		Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	G M	c / q	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o $IP < 4$	A los materiales sobre la línea A con $4 < IP < 7$ se considera de frontera y se les asigna doble símbolo	
			GC		Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcillosas	Límites de Atterberg por encima de la línea A o $IP > 7$		
	Arenas (Si más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4)	Arenas limpias (pocos o ningún fino)	SW		Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = 1 < D_{30}/D_{10} \times D_{60} < 3$		
			SP		Arenas pobremente gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para SW		
Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)		S M	c / q	Arenas limosas, mezclas arena-limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o $IP < 4$	Si el material está en la zona sombreada con $4 \leq IP \leq 7$ se considera de frontera y se le asigna doble símbolo		
		SC		Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla	Límites de Atterberg por encima de la línea A o $IP > 7$			
Suelos de grano fino Si más del 50% del material pasa el tamiz No. 200	Limos y arcillas (Límite Líquido $LL < 50$)	ML		Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad	1. Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva de granulometría. 2. Dependiendo del porcentaje de finos (fracción menor que el tamiz No. 200) los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% --- GW, GP, SW, SP Más del 12% --- GM, GC, SM, SC De 5 a 12% --- Casos de frontera que requieren doble símbolo			
		CL		Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras				
		OL		Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad				
	Limos y arcillas (Límite Líquido $LL > 50$)	MH		Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, suelos elásticos				
		CH		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas				
		OH		Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos				
	Suelos altamente orgánicos	Pt		Turba y otros suelos altamente orgánicos				

Fuente: López, Heidi.

Tabla 6. Clasificación de suelos de la American Association of State Highway Officials AASTHO M-145

CLASIFICACIÓN GENERAL	MATERIALES GRANULARES							MATERIAL LIMO ARCILLOSO			
	(35% o menos pasa la malla No.200)							(Pasan más del 35% la malla No.200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación por grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
											A-7-6
Análisis Granulométrico (%) que pasa											
No. 10	50 máx										
No. 40	30 máx	50 máx	51 mín								
No. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características de la tracción que pasa la malla No.40											
Límite Líquido				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de Plasticidad	6 máx		no plástico	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipos usuales de los materiales componentes importantes	fragmentos de piedra grava y arena		arena fina	arena y grava limosas o arcillosas				suelo limoso		suelos arcillosos	
Clasificación general como subrasante	DE EXCELENTE A BUENA							DE REGULAR A MALA			

Fuente: Fuente: Grijalva, C. (2011).

El ensayo de granulometría nos servirá para conocer el diámetro del suelo que estemos evaluando y el porcentaje (%) de grava, arena y material fino que este posee; asimismo, por medio de la masa unitaria suelta se determinará si el suelo es liviano o pesado, y así, tener una idea previa del tipo de tratamiento que se debe realizar y la clasificación según la norma el Sistema Unificado de Calcificación de Suelos (S.U.C.S) y las normas AASHTO M 145.

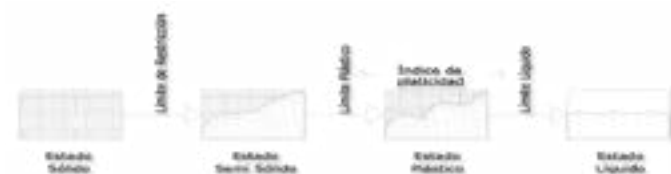
Estudio de Límites de Atterberg

Los análisis se realizan bajo las normas siguientes:
AASHTO T 89, AASHTO T 90, ASTM D 4318.

Según el Manual de Mecánica de Suelos del Centro Universitario de Occidente de la Universidad de San Carlos de Guatemala, indica que los límites de Atterberg están determinados por la reducción gradual del contenido de agua que posee una suspensión espesa de material arcilloso, pasando de un estado líquido al estado plástico y finalmente al estado sólido.

Los límites de Atterberg caracterizan los cuatro estados de consistencia (sólido, semisólido, plástico, semilíquido o viscoso) En que se puede encontrar un suelo de grano fino. En la figura siguiente se podrá observar como un material transita desde un estado sólido hasta llegar a un estado líquido.

Figura 7. Estado de consistencia de un suelo



Fuente: Cementos Progreso. Tol, L. (2023).

Características del suelo según la Clasificación de Atterberg:

Plasticidad (P):



Grado de cohesión que tienen las partículas de arcillas, dependerá de la cantidad de agua que contiene.

Límite Plástico (LP):



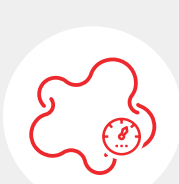
Es el contenido de humedad, en el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado semisólido y el estado plástico.

Límite Líquido (LL):



Es el contenido de humedad en el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado plástico para pasar al estado líquido o semilíquido.

Índice de Plasticidad (IP):



Es la diferencia entre el límite líquido (LI) y el límite plástico (LP) y representa la variación de humedad que puede tener un suelo que se conserva en estado plástico.

Los suelos finos clasificados por el grupo A-7 de la AASHTO M 145 y clasificados en el grupo CH u OH del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S), poseen propiedades plásticas que se pueden considerar de baja plasticidad o alta plasticidad de acuerdo al porcentaje que posea, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 7. Contenido de plasticidad de un material arcilloso

IP	Característica
IP > 15	El suelo es altamente plástico
7 < IP < 15	El suelo es medianamente plástico
IP < 7	Suelo con baja plasticidad
IP = 0	Si no existe límite líquido o límite plástico, el suelo será No Plástico

Fuente: Cementos Progreso. Tol, L. (2023).

Estudio de Sulfatos Solubles

Los análisis se realizan bajo las normas siguientes:
AASHTO T 290, UNE 1744-1

El ensayo elaborado bajo las normas mencionadas, nos permite determinar la cantidad de sulfato contenido en un suelo, mediante el porcentaje (%) de sulfato soluble en agua.

Figura 8. Sulfato en el suelo



Fuente: Geotechnical Consulting ABC. (2023).

De acuerdo a la definición proporcionada en el artículo Cloruros y Sulfatos del sitio Web de Geotechnical Consulting ABC en el 2023, los sulfatos son las sales orgánicas o minerales, que están compuestas por ácido sulfúrico, azufre y oxígeno que son compuestos químicos. Por lo tanto, las sales que forman un ácido sulfúrico reciben el nombre de sulfatos. Los sulfatos se encuentran de manera natural en diversos minerales, como lo son: barita, epsomita, tiza, entre otros.

En los suelos salinos es frecuente los sulfatos sódicos, su florescencia tienen una apariencia jabonosa y un sabor salado. Su solubilidad es afectada fuertemente por los cambios de temperatura, lo que provoca que tienda a concentrarse en la superficie del suelo, ya que durante el período cálido asciende a la superficie del suelo formando parte de las eflorescencias, lo que es un rasgo muy típico de los suelos salinos y durante el período húmedo, con el frío, se lava menos que las otras sales. Además, es mucho menos tóxica que el sulfato magnésico. Por su parte, el sulfato magnésico es una sal que se encuentra comúnmente en los suelos salinos, es muy soluble y altamente tóxica.

Estudio de Materia Orgánica

Los análisis se realizan bajo las normas siguientes: **AASHTO T 194, ASTM D 2974.**

El ensayo elaborado bajo las normas mencionadas, nos permite determinar la cantidad de contenido orgánico en los suelos, estos materiales son identificados como turbas, lodos orgánicos, y material vegetal no descompuesto, partículas de suelo que contiene altos contenidos de vegetación.

Figura 9. Clasificación de materia orgánica



Fuente: Centro Tecnológico -CETEC-, Cementos Progreso. (2023).

ESTUDIOS DE COMPORTAMIENTO

Eades y Grim (pH)

Los análisis se realizan bajo las normas siguientes: ASTM D 6276.

Este ensayo nos permite estimar la proporción de material para estabilizar un suelo. La prueba de pH suelo-Hidrovia+ se realiza para indicar la proporción suelo-Hidrovia+, mantener el pH elevado y las reacciones requeridas para estabilizar un suelo.

Las pruebas de desempeño normalmente se realizan en un laboratorio para verificar los resultados de este método de prueba. Este método de prueba no proporcionará información confiable relativa a la reactividad potencial de un suelo en particular, ni proporcionará información sobre la magnitud del aumento de resistencia que se logrará al tratar este suelo con el porcentaje indicado de cal.

Este método de prueba se puede usar para estimar el porcentaje de Hidrovia+, cal hidratada o cal viva en la estabilización de un suelo. Los suelos candidatos comunes contienen minerales arcillosos y tienen un índice de plasticidad ≥ 10 .

Una recomendación muy importante es que este ensayo es exclusivamente para suelos arcillosos, por lo cual, se debe realizar los ensayos de granulometría y límites de Atterberg previamente a realizar el ensayo de Eades y Grim.

Los suelos pueden estar en un rango que va desde muy ácido, neutro y muy alcalino, dependiendo del pH que el suelo contenga. A continuación, se muestra una tabla del porcentaje de pH que puede poseer un suelo y como se clasifica.



Tabla 8. Clasificación de un suelo según el nivel pH

NIVEL PH	CLASIFICACIÓN DE SUELO
0 < 5.5	Muy ácido
5.5 < 6.5	Ácido
6.5 < 7.5	Neutro
7.6 < 8.5	Básico o ligeramente alcalino
8.6 y mayores	Muy alcalino

Fuente: Cementos Progreso: Tol, L. (2023).

Es importante tener en cuenta que, para alcanzar la estabilización adecuada, es necesario realizar ensayos que nos permita conocer la resistencia que el suelo alcanza con la dosificación utilizada.

Ensayo de compactación Proctor estándar y modificado

Los análisis se realizan bajo las normas siguientes: **AASHTO T 99, T 180.**

El objetivo de este ensayo es obtener la humedad óptima de un suelo para alcanzar la máxima densidad seca de un suelo aplicando una energía determinada. Dependiendo de los resultados obtenidos en este estudio, se podrá a mejorar las características del mismo. Las características que se necesitan mejorar es el aumento de capacidad y estabilidad de carga, reduciendo los asentamientos y la infiltración de agua en el suelo mejorado.

El beneficio de obtener la humedad optima de compactación de un suelo son los siguientes:

- 1. Aumento de la capacidad portante del suelo:** al realizarse la compactación adecuada, la unión o cohesión entre partículas aumenta, por lo cual la resistencia del suelo aumenta.
- 2. Mayor impermeabilización:** la cohesión de las partículas del suelo impide la infiltración de las aguas por el suelo, evitando la acumulación de agua dentro de las capas granulares del suelo.
- 3. Disminuye los cambios volumétricos:** los cambios volumétricos de un suelo se clasifican en cambio por contracción y expansión, estos son generados por

la humedad acumulada en el interior de las capas granulares del suelo. Esos cambios disminuyen o se eliminan por la unión de las partículas del suelo al aplicar energía de compactación.

a. Clasificación

- 1. Ensayo Proctor estándar:** de acuerdo con la normativa ASTM D 698, se aplica una energía de compactación media, el cual se puede aplicar en un terraplén, rellenos de zanjas, vías de comunicación secundarias.

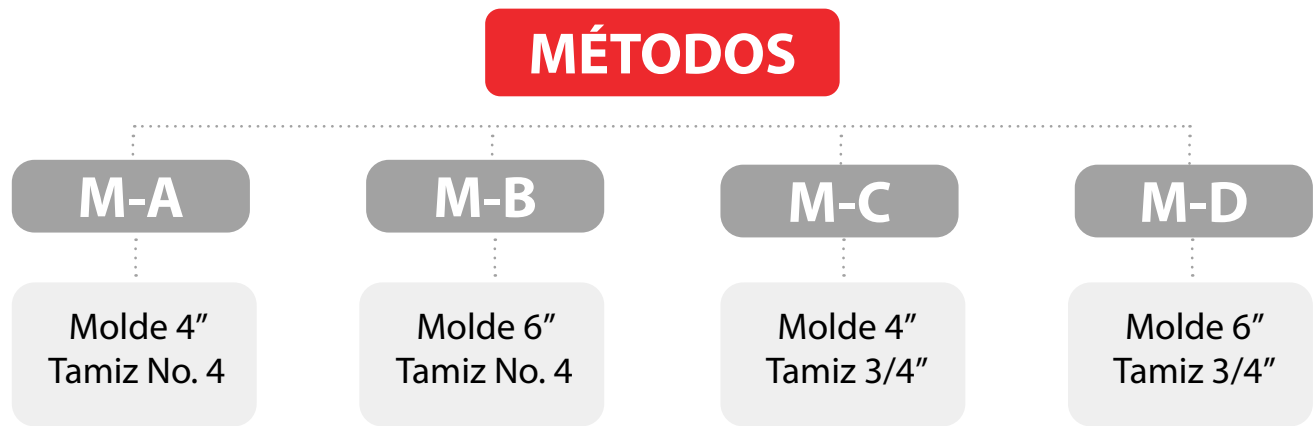
El objetivo del ensayo será obtener la densidad máxima de un suelo y la humedad optima que es necesaria aportar para alcanzar dicha densidad. Para la realización de este ensayo utilizaremos un molde cilíndrico con una capacidad de 1,000 cm³, el cual es relleno con tres capas de material granular debidamente compactado con un martillo tipo de 2.5 kg de peso, la cual se deja caer libremente 25 veces sobre una altura de 305 mm.

- 2. Ensayo Proctor modificado:** de acuerdo a la normativa ASTM D 1557, la energía de compactación es mayor que la aplicada en el ensayo estándar, y este se aplica en sub rasante o las capas de una estructura de pavimento o estructuras que soportarán cargas considerables. Utilizaremos un molde metálico con una capacidad de 2,320 cm³ y una maza de 4.535 kg, la cual se dejará caer en este caso desde una altura mayor (457 mm), dando lugar a una energía de compactación mayor. Además, en lugar de 3 capas de material granular, se dispondrán 5 capas, dando a cada una de ellas un total de 25 golpes.

Existen cuatro métodos para realizar el ensayo Proctor modificado, el cual se caracterizan de acuerdo al diámetro del molde y el número de tamiz que debe pasar el material que se estudia.

Los métodos para realizar el ensayo Proctor, se muestran en la siguiente imagen:

Figura 10. Métodos de elaboración ensayo Proctor

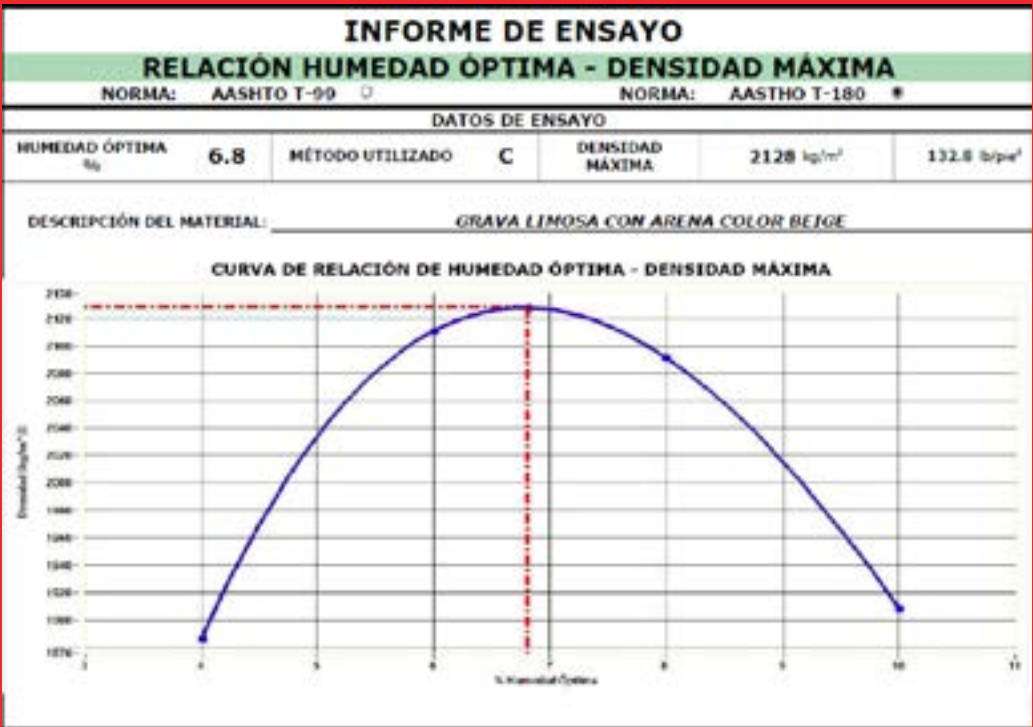


Fuente: Cementos Progreso, Tol. L. (2023).

b. Resultados

Después de obtener el valor de la Densidad Máxima y la Humedad Óptima se procederá a la interpretación de los resultados en los cuales los valores estarán representados por medio de una gráfica, la cual nos indicará el grado de compactación y si el suelo es susceptible a la humedad. A continuación, un ejemplo:

Figura 11. Curva de compactación



Fuente: Centro Tecnológico -CETEC-, Cementos Progreso, Resultado de ensayo Proctor, (2023).

Ensayo Relación Soporte California (CBR)

Los análisis se realizan bajo las normas siguientes:
AASHTO T 193, ASTM D 1883.

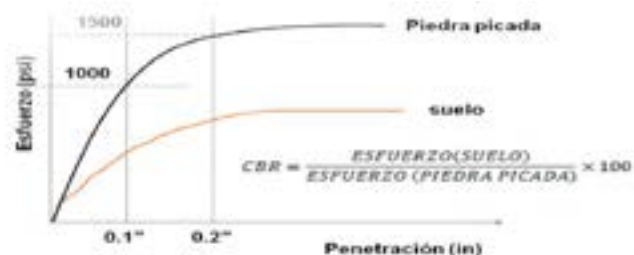
El Ing. Freddy Sanchez, profesor del Instituto Tecnológico de Monterrey (TEC), en el artículo publicado ¿qué es el CBR? de fecha 15 de diciembre de 2018 y actualizado el 29 de diciembre de 2020 indica que, el CBR es un ensayo para evaluar la calidad de un material de suelo con base en su resistencia, medida a través de un ensayo de placa a escala.

Según la norma ASTM D 1883-07, tomado del mismo artículo, el CBR es un ensayo de carga que usa un pistón metálico, de 0.5 pulgadas cuadradas de área, para penetrar desde la superficie de un suelo compactado en un molde metálico a una velocidad constante de penetración. Se define CBR, el parámetro del ensayo, como la relación entre la carga unitaria en el pistón requerida para penetrar 0.1" (0.25 cm) y 0.2" (0.5 cm) en el suelo ensayado, y la carga unitaria requerida para penetrar la misma cantidad en una piedra picada bien gradada estándar; esta relación se expresa en porcentaje. Por cada espécimen de suelo se calculan dos valores de CBR, uno a 0.1" de penetración, y el otro a 0.2" de penetración. La pregunta de siempre es ¿cuál de los dos es el CBR que se reporta? ASTM dice que el que se reporta es el de 0.1" mientras este sea menor que el de 0.2". En el caso en el que el valor de CBR para 0.1" fuera mayor que el de 0.2" habría que repetir el ensayo para ese espécimen.

a. Resultados

En una escala de (0% a 100%), los valores que se obtienen cercanos al 0% indican que el suelo es de calidad pobre, caso contrario, los valores cercanos al 100% indican que el suelo es de mejor calidad. Por lo tanto, el valor de CBR es la relación entre la carga necesaria para producir un nivel de deformación prestablecido en el suelo que se está ensayando y la carga que se necesitaría para producir la misma penetración en la piedra picada californiana, tal como se muestra en figura siguiente:

Figura 12. Valor de CBR



Fuente: Sanchez, Freddy.(2018).

En la imagen siguiente se muestra los resultados que se obtuvieron de un ensayo CBR a una muestra de suelo con un valor de Humedad Óptima de 8.1% y Densidad Seca Máxima de 129.5 lb/p3 equivalente a 2074 kg/m3, elaborado bajo la norma AASHTO T 193 y realizado en el laboratorio de suelos de planta La Pedrera, Cementos Progreso.

Figura 13. Resultado ensayo CBR



Fuente:Centro Tecnológico -CETEC-, Cementos Progreso, Informe de ensayo de penetración -CBR-. (2023).

Figura 14. Grafica ensayo de penetración CBR



Centro Tecnológico -CETEC-, Cementos Progreso, Informe de ensayo de penetración -CBR-. (2023).

Ensayo de compresión axial no confinada (probetas a compresión)

Los análisis se realizan bajo las normas siguientes: ASTM D 1632, ASTM D 1633.

El objetivo es determinar la resistencia o esfuerzo último de un suelo cohesivo a la compresión no confinada, aplicando una carga axial con control de deformación y utilizando una muestra de suelo representativa tallada en forma de cilindro.

El resultado se utiliza en los procedimientos de diseño de mezclas de suelo y conglomerantes y que a continuación se mencionan los principales factores:

- Determinar si un suelo logrará un aumento significativo de la resistencia con la adición de conglomerante
- Agrupar las mezclas de suelo y conglomerante en clases de resistencia
- Estudiar los efectos de variables tales como porcentaje de conglomerante, peso unitario, contenido de agua, tiempo de curado, temperatura de curado, etc.
- Para estimar otras propiedades de ingeniería de las mezclas de suelo y conglomerante.

A continuación, se presenta un ejemplo de los resultados del ensayo de compresión axial no confinada:

Figura 15. Resultado de ensayo de probetas a compresión

INFORME DE ENSAYO											
RESISTENCIA A COMPRESIÓN NO CONFINADA DE PROBETAS DE SUELO											
NORMA: ASTM D-1632 Y D-1633											
DATOS DE ENSAYO											
No.	Peso (g)	Carga Máxima (N)	Factor de Corrección	Área sección transversal (mm²)	Resistencia Corregida por Esbeltez			Fecha de elaboración	Edad de ensayo	Fecha de rotura	Descripción del material
					kPa	psi	Mpa				
1	1900.0	66600.0	0.925	6011.8	7910	1145	7.9	2023-06-01	7	2023-06-08	SUELO ESTABILIZADO CON CA
2	1990.0	72400.0	0.925	6011.8	8395	1215	8.4	2023-06-01	7	2023-06-08	SUELO ESTABILIZADO CON CA
3	1952.0	73400.0	0.924	6011.8	9470	1350	8.5	2023-06-01	28	2023-06-29	SUELO ESTABILIZADO CON CA
4	1924.0	65300.0	0.924	6011.8	7525	1090	7.5	2023-06-01	28	2023-06-29	SUELO ESTABILIZADO CON CA
5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
7	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
9	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

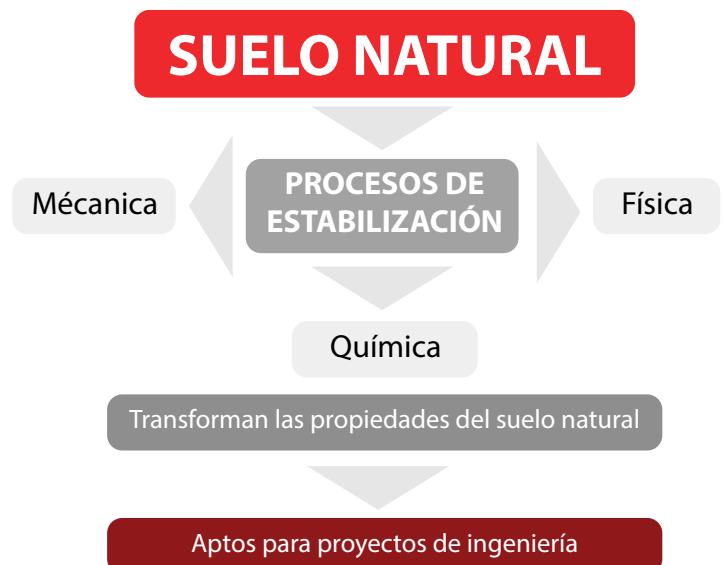
Fuente: Centro Tecnológico, Cementos Progreso, Informe de ensayo de compresión axial no confinada, (2023).

TIPOS DE ESTABILIZACIÓN

Según el documento de caracterización de suelos arcillosos tratado con Hidróxido de Calcio, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Tunja, Colombia, Higuera, C. (2012), la estabilización de suelos es una serie de procesos mecánicos, físicos, físicos-químicos y químicos que transforman las propiedades de los suelos.

De acuerdo a las propiedades físicas de un suelo existente en un proyecto y la disponibilidad de materiales para realizar una estabilización, es necesario evaluar cual puede ser el proceso adecuado para mejorar las condiciones de dicho suelo y que pueda cumplir con las especificaciones establecidas en el diseño. Por lo cual, se presentan los tipos de estabilización de suelos que puedan aplicarse, siendo los siguientes:

Figura 16. Diagrama de flujo de estabilización de suelos



Fuente: Higuera, H. (2012).

Tabla 9. Tipos de estabilización de suelos

Estabilización	Proceso	Produce
Mecánica	Proceso de compactación	Densificación del suelo
Físico	Sustitución Granulométrica	Fricción y cohesión del suelo
	Incorporación de suelo betún	Cohesión e impermeabilización
Físico-Químico	Mezcla de suelo, cemento o cal	Intercambio iónico y cementación

Fuente: Higuera, H. (2012).

ESTABILIZACIÓN MECÁNICA

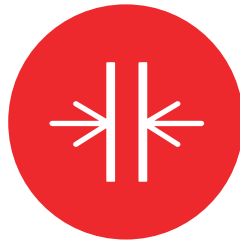
La estabilización mecánica consiste en el proceso de escarificación, homogenización, compactación y curado del suelo existente en un proyecto. Para este proceso, no es necesario la aplicación de otro suelo o material químico, ya que se aprovecha el suelo existente en el área del proyecto.

El método de estabilización mecánica se debe aplicar para suelos no cohesivos, como se indica en la tabla No.6 de la AASHTO M 145.



Beneficios físicos de la estabilización mecánica

Al realizar una estabilización aplicando el método mecánico las propiedades físicas del suelo adquieren los beneficios siguientes:



a. Densificación del suelo:

la densidad y cohesión del suelo por la energía que se incorpora al realizar la compactación.



b. Resistencia del suelo:

la densificación de las partículas del suelo genera aumento de la resistencia aumentando la capacidad cargas superficiales.



c. Disminuye la compresibilidad:

al aumentar la resistencia del suelo y aumentar la capacidad de carga, el suelo es menos compresible, por lo cual existe una disminución considerable de que existan deflexiones en el suelo estabilizado.



d. Impermeabilidad:

el aumento de la cohesión de las partículas del suelo genera aumento de la impermeabilidad.



Ventajas de la estabilización mecánica

Al realizar una estabilización por el método mecánico obtenemos las ventajas siguientes:



a. Aprovechamiento del suelo del proyecto: es posible utilizar el mismo suelo del área que se va a estabilizar, independientemente de las propiedades físicas que este posea.



b. Disminución de uso de bancos de préstamo de material: se disminuye o se evita la explotación de montañas para extraer material que posteriormente sirva para la sustitución del suelo del proyecto.



c. Disminución de uso de vertederos: debido que no es necesario realizar la extracción del suelo natural de un proyecto, se disminuye o no es necesario el uso de vertederos para el depósito del suelo inadecuado.



d. No es necesario el acarreo de material de un banco de préstamo: al utilizar el mismo material del proyecto, se evita el acarreo o trasiego de material de un banco de préstamo o vertedero natural.



e. Disminuye la contaminación generada por CO2.: debido que no existe acarreo de material de un banco de préstamo, tampoco será necesario el uso de maquinaria que ejerza este trabajo, por lo cual, genera la disminución de emisión de gases contaminantes al ambiente.



f. Cuidado del ambiente y recursos naturales.



g. Disminución de costos por operación: se economiza los costos destinados a la operación por extracción y acarreo de material de sustitución.



h. Reduce el tiempo de ejecución.

Desventajas de la estabilización mecánica

La estabilización de suelos por el método mecánico presenta las desventajas siguientes:



a. El tiempo de vida útil es corto: debido que las propiedades físico-químicas del suelo que se estabiliza no cambian, la densificación, resistencia, compresibilidad e impermeabilidad del suelo se perderá en corto tiempo, volviendo a las condiciones inestables iniciales.



b. Los periodos de mantenimiento son frecuentes: al volver a las condiciones inestables iniciales en un periodo de tiempo corto, la frecuencia de mantenimiento aumenta, elevando los costos de operación por mantenimiento.



c. No es apto para soportar capas de estructuras de pavimento: debido que las propiedades físico-químicas del suelo no se mejoran, es muy poco probable que la resistencia del suelo estabilizado únicamente por la compactación pueda soportar las cargas distribuidas por las capas superiores de un pavimento rígido o flexible.



d. Uso para tránsito liviano: es recomendable que las cargas aplicadas a un suelo estabilizado por el método mecánico sean cargas por tránsito liviano.

Recomendaciones de estabilizar por el método mecánico

Al realizar la estabilización por el método mecánico se recomienda lo siguiente:



a. Realizar estudios de Granulometría, Límites de Atterberg y Proctor para conocer las propiedades físicas del suelo.



b. En la ejecución del proyecto, se recomienda realizar el ensayo de Control de Compactación por el método de Cono y Arena.

ESTABILIZACIÓN **FÍSICA**

Nuevamente citando Higuera, C (2012), la estabilización física consiste en aumentar la fricción, la cohesión y la impermeabilidad de un suelo ajustándolo granulométricamente por medio de la adición de otro material.

Materiales estabilizadores físicos



a. Material granular: según el libro de Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de Guatemala en la sección 302, los materiales granulares para la estabilización física de sub rasantes deben poseer menos del 3% de hinchamiento de acuerdo con el ensayo AASHTO T 193 (CBR).



b. Material Geosintéticos: según el libro de Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de Guatemala en la sección 409, los Geosintéticos son telas o membranas de material geotextil o de geo-compuestos, fabricados de fibra sintética como poliéster o polipropileno.

Beneficios de la estabilización física

Los beneficios de estabilizar un suelo por el método físicos:



1. Aumenta la cohesión entre las partículas de un suelo.



2. Aumenta la fricción interna entre las partículas de un suelo.



3. Aumenta la impermeabilidad de un suelo.



4. Aumenta la resistencia de un suelo.



Ventajas de la estabilización física



a. Sustitución natural del suelo: es posible sustituir completamente o parcialmente el suelo con características inadecuadas por material adecuado que cumpla con las especificaciones de diseño del proyecto.



b. Control de calidad al utilizar Geosintéticos: la estabilización con geo-sintéticos provee de certificado de calidad.



c. Facilidad de instalación al utilizar material geosintético.



d. Mayor vida útil: al sustituir el suelo por otro material que reúna las condiciones apropiadas del diseño, el tiempo de vida útil aumenta, esto debido a que se cambia por completo las propiedades del suelo inadecuado.



e. Disminuye el tiempo de mantenimiento: los períodos que se requiere para realizar el mantenimiento disminuyen, ya que las propiedades del suelo cambian al ser sustituidos por un material diferente y que cumpla las propiedades requeridas.



f. Soporta capas de estructuras de pavimento: el suelo estabilizado es capaz de soportar las cargas distribuidas por capas superiores de una estructura de pavimento rígido o flexible.

Desventajas de la estabilización física

-  **a.** No se aprovecha el suelo natural del proyecto.
-  **b.** Es necesario realizar explotación de canteras para hacer la sustitución parcial o completa del suelo de un proyecto.
-  **c.** Es necesario utilizar vertederos naturales para el depósito del material inadecuado que se extraiga de un proyecto.
-  **d.** Aumento del tiempo de ejecución de la estabilización, derivado del trasiego de material desde el banco de explotación hacia la ubicación del proyecto. Considerando que dependiendo del área los bancos de explotación pueden estar a distancias largas.
-  **e.** Aumento de costo por gastos operativos debido al acarreo de material.
-  **f.** Contaminación del ambiente por emisión de gases emitidos por maquinaria, contaminación por la explotación de montañas para uso del material de sustitución y uso de vertederos para el depósito de material inadecuado.

Recomendaciones para la estabilización física

Según las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de Guatemala se debe tomar en cuenta:



1. Utilizar los suelos granulares con menos de 3% de hinchamiento de acuerdo con el ensayo AASHTO T 193.



2. La escarificación del suelo debe ser a una profundidad máxima de 0.20 m y se deben eliminar las rocas que sean igual o mayor al 0.10 m.



3. Es posible realizar cortes que sobre pasen los 0.20 m iniciales, pero debe ser aprobado por el ingeniero residente del proyecto.



4. Realizar pruebas de densidad de campo.



5. No utilizar suelos altamente orgánicos, constituidos por materias vegetales parcialmente carbonizadas o fangosas como se clasifica en el grupo A-8 de la AASHTO M 145. Estos materiales están constituidos por materia orgánica parcialmente podrida y con textura color café oscuro o negro y olor a podredumbre. Son altamente compresibles y tienen baja resistencia.



6. No se debe utilizar las rocas aisladas, mayores de 100 mm, que se encuentren incorporadas en los 300 mm superiores de la capa de suelo de subrasante.

ESTABILIZACIÓN QUÍMICA



Fuente: Cementos Progreso, (2023).

Según el documento de estabilización química de suelos materiales convencionales y activados alcalinamente de la Universidad del Valle, Colombia, estabilizar un suelo por el método químico significa incorporar o a un suelo otros materiales o productos químicos, los cuales tendrán la capacidad de modificar las propiedades del suelo natural.

La modificación de las propiedades del suelo se realiza con el objetivo de mitigar problemas de inestabilidad volumétrica o incrementar alguna de las propiedades naturales, tales como la resistencia y la durabilidad.

La estabilización química consiste en la aplicación de conglomerantes o estabilizantes que, al ser homogenizados con el suelo natural del proyecto, mejoran o estabilizan las propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo. Este tipo de estabilización procede únicamente para los suelos clasificados dentro del grupo "A-4, A-5, A-6, A7" de la tabla AASHTO M 145 y según la clasificación S.U.C.S.

Ventajas de la estabilización química

Las ventajas de realizar una estabilización química son las siguientes:



1. Disminuye la humedad de los suelos debido al calor y evaporación generada por los cambios químicos que se producen al entrar en contacto el material estabilizante con el suelo húmedo.



2. Se modifica la granulometría del suelo. Según AASHTO M 145, los suelos naturales, clasificados como limos y arcillas, pasan más del 35% el tamiz No.200. Al mezclar este suelo con un material químico estabilizante se forman grumos de partículas, por lo cual, la granulometría cambia positivamente y permite mejor trabajabilidad de suelo homogenizado.



3. Disminuye la plasticidad en los suelos de grano fino que posean Índice de Plasticidad mayor a 10. Los suelos finos, clasificados como suelos arcillosos, en su estado natural, según AASHTO M 145, poseen un índice de plasticidad mínimo de 11%, por lo que los vuelven muy inestables y susceptibles a los cambios volumétricos, provocados por la humedad y evaporación del agua acumulada en las partículas internas del suelo.



4. Modifica el grado de acidez o alcalinidad (pH) de un suelo, esta propiedad indica si un suelo es ácido, neutro o alcalino. Según Eades y Grim (ASTM D 6276) un suelo con pH de 12.40 se considera como un suelo estabilizado.



5. Aumenta de la resistencia a compresión; según el libro de Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de Guatemala en la sección 307, indica que la resistencia a la compresión no confinada de un suelo estabilizado químicamente a los siete (7) y veintiocho (28) días, es la siguiente:

Tabla 10. Requisitos de resistencia a la compresión no confinada

Estabilizador	Resistencia mínima a la compresión		Edad en días	Especificación
	Sub-base	Base		
Cal	1.40 MPa	2.00 MPa	28	ASTM D 5102
Cal - puzolana	2.40 MPa	3.50 MPa	7	ASTM C 593
Cal - cemento-puzolana	2.40 MPa	3.50 MPa	7	ASTM D 1633
Cemento-puzolana	2.40 MPa	3.50 MPa	7	ASTM D 1633
Cemento	2.40 MPa	3.50 MPa	7	ASTM D 1633

Fuente: Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de Guatemala, Ministerio de comunicaciones, infraestructura y vivienda, Guatemala. (2001).



6. Disponibilidad inmediata en el mercado de materiales químicos estabilizantes, tales como el cemento, cal y terraforte.



7. Fácil aplicación manual del material, colocando sacos distribuidos uniformemente de acuerdo a la cantidad requerida por metro cuadrado.



8. Fácil aplicación del material por medio de un camión esparcidor, distribuyendo el material en el área a estabilizar, de acuerdo a la cantidad requerida por metro cuadrado.



9. Disminución o cancelación del trasiego de material de sustitución de un banco de materiales o cantera, hacia la ubicación de un proyecto. .



10. Disminución o cancelación de uso de vertederos naturales, los cuales son utilizados para el depósito del material inadecuado existente en un proyecto.



11. Reciclabilidad del suelo debido que al incorporar un material estabilizante químico, las propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo inadecuado mejoran.



12. Beneficio ambiental ambientales: los índices de emisión de CO2 disminuye debido que no es necesario realizar el trasiego de material de sustitución, por lo cual se usa en menor cantidad maquinaria que emita estos gases hacia el ambiente.





Desventajas de la estabilización química

Se considera como una desventaja al realizar una estabilización por incorporación de materiales químicos, lo siguiente:

-  1. Utilizar materiales que no cumplan con las especificaciones de las normas nacionales e internacionales.
-  2. La cantidad de material fino que posea el suelo natural.
-  3. El contenido de arcilla en el suelo.
-  4. Las características mineralógicas del suelo, esto dependerá de la ubicación geográfica, debido que las propiedades físicas son diferentes en cada región de la república.
-  5. El contenido de materia orgánica y sulfatos solubles del suelo puede afectar la reacción química un material estabilizante con el suelo natural.
-  6. Falta de supervisión profesionalizada en el proceso de la estabilización.
-  7. Falta de equipo adecuado en la ejecución de la estabilización.

Recomendaciones de la estabilización química

Al realizar la estabilización de un suelo por medio de la incorporación de materiales químicos, es necesario tomar en cuenta las recomendaciones siguientes:



a. Para alcanzar los resultados de acuerdo a las especificaciones de un proyecto, se recomienda que el material estabilizante cumpla con las normas ASTM, AASHTO, UNE, COGUANOR.



b. Realizar ensayos de identificación, (Granulometría, Límite de Atterberg, Sulfatos solubles) y comportamiento (Proctor, CBR, pH, Compresión Axial no Confinada) de suelos, previo a la aplicación del material estabilizante. Estos ensayos son necesarios para conocer las propiedades del suelo que se estabilizará; asimismo, se podrá determinar la dosificación adecuada de estabilizante a aplicar.



c. Extraer todo material orgánico e inorgánico del suelo que se estabilizará, debido que estos materiales evitarán que las reacciones físicos-químicos del suelo y el estabilizante sean la esperadas según especificaciones de un proyecto.

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON **CEMENTO HIDRÁULICO PROGRESO UGC**



Fuente: Cementos Progreso, (2023).

Es un cemento Portland UGC con adición de puzolana natural y se clasifica como cemento para uso general en la construcción según la norma **ASTM C 1157**. Por las características propias de este material, puede ser utilizado en prácticamente todas las actividades típicas de la construcción incluyendo pavimentos.

Algunas características del conglomerante hidráulico son las siguientes:

- El cemento debe garantizar un plazo de trabajabilidad alto, por lo cual los tiempos de fraguado deben ser amplios. Esto evitará que el suelo homogenizado y estabilizado pueda agrietarse, provocando disminución en la resistencia del suelo compactado.
- Para evitar la retracción y la fatiga inicial del suelo estabilizado causado por las cargas externas, se recomienda que el cemento homogenizado con el suelo natural tenga a edades tempranas un lento desarrollo de la resistencia y módulo de rigidez y que esta pueda ser recuperada en un plazo mayor de tiempo.

De acuerdo a las especificaciones de la COGUANOR NTG 41095, el cemento que se recomienda para obras de estabilización es el siguiente:

- **Desarrollo Lento de Resistencia (DLR):** para estabilización de suelos, concreto compactado con rodillo (CCR) para pavimentos y para presas. Se debe despachar preferentemente a granel.

Sin embargo, se adjunta la clasificación de los tipos de cemento según el uso para el que se requiera, extraído de la misma especificación COGUANOR NTG 41095.

- **Tipo UG:** cemento hidráulico para uso general. Debe utilizarse en la construcción de toda clase de obras, pequeñas, medianas o grandes, donde no se requieran otros tipos de cementos con propiedades especiales
- **Tipo AR:** alta resistencia inicial. Para obras especiales de concreto simple, reforzado y pre esforzado de endurecimiento rápido y altas resistencias iniciales. Para la prefabricación liviana y de elementos estructurales y cuando se requiere desencofrado y desmoldado rápido.
- **Tipo MRS:** moderada resistencia a los sulfatos. Para concretos en aguas y terrenos que contienen sulfatos, concretos en aguas marinas o en ambientes marinos y concretos expuestos a concentraciones moderadas de sulfatos de calcio, sodio y magnesio, en aguas o suelos.
- **Tipo ARS:** alta resistencia a los sulfatos. Para concretos en aguas y terrenos que contienen sulfatos, concretos en aguas marinas o en ambientes marinos y concretos expuestos a concentraciones altas de sulfatos de calcio, sodio y magnesio, en aguas o suelos.
- **Tipo MCH:** moderado calor de hidratación. Para obras de concreto masivo susceptibles de fuertes retracciones por variaciones térmicas y peligro de fisuración (presas, estribos, cimentaciones, muros gruesos y grandes losas). Para obras de concreto normal en ambientes muy calurosos.
- **Tipo BCH:** bajo calor de hidratación. Se utiliza cuando interesa que el concreto desarrolle poco calor a partir de la hidratación del cemento, como es el caso de las presas de concreto, bases de grandes dimensiones y otras construcciones masivas.

Es importante tomar en cuenta que los requisitos físicos del cemento que se utilizará en la estabilización de suelos u otro uso de construcción, cumplan con especificado en la norma COGUANOR NTG 41095, como se indica en la tabla siguiente:



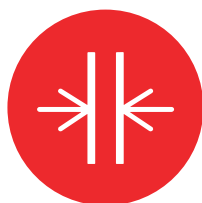
Tabla 11. Requisitos físicos del cemento para uso en estabilización, COGUANOR NTG 14095

Método de ensayo		Tipos de cemento						
		UG	AR	DLR	MRS	ARS	MCH	BCH
Finura	NTG 41003 h6 (ASTM C430) NTG 41014 h2 (ASTM C204)	A	A	A	A	A	A	A
Expansión en autoclave, cambio de longitud en porcentaje, (%) máximo	NTG 41014 h1 (ASTM C151)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Expansión Chatelier, en milímetros [#]	UNE-EN 196-3	10	10	10	10	10	10	10
Tiempo de fraguado Vicat en minutos								
Inicial, no menor que	NTG 41003 h10 (ASTM C191)	45	45	45	45	45	45	45
Inicial, no mayor que		420	420	420	420	420	420	420
Contenido de aire en el mortero ^o en %	NTG 41003 h3 (ASTM C185)	12	12	12	12	12	12	12
Resistencia a compresión mínima en MPa, [psi] ^o a 28 días								
1 día		12 [1740]						
3 días		13 [1890]	24 [3480]		11 [1600]	11 [1600]	5 [725]	
7 días	NTG 41003 h4 (ASTM C 109)	20 [2900]			18 [2610]	18 [2610]	11 [1600]	11 [1600]
28 días		28 [4050]		11 [1600]		25 [3620]		21 [3050]
90 días				18 [2610]				
Calor de hidratación,								
7 días, máximo en kJ/kg (kcal/kg)	ASTM C186	—	—	—	—	—	290 (70)	250 (60)
28 días, máximo en kJ/kg (kcal/kg)		—	—	—	—	—	—	290 (70)
Expansión de la barra de mortero, % máximo 14 días	NTG 41014 h3 (ASTM C1038)	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Expansión a los sulfatos (resistencia a los sulfatos) ^o								
6 meses, % máximo	NTG 41014 h5 (ASTM C1012)	—	—	—	0.10	0.05	—	—
1 año, % máximo		—	—	—	—	0.10	—	—
Opción BRA/R Baja reactividad con agregados reactivos a los álcalis ^o								
Expansión barra de mortero								
14 días, % máximo	NTG 41003 h7 (ASTM C227)	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
56 días, % máximo		0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060
Opción BL Color blanco								
Índice de blancura, % mínimo	Índice de blancura de CIE	70	70	70	70	70	70	70
Opción A Con incorporador de aire								
Contenido de aire en el mortero ^o								
Máximo en %	NTG 41003 h3 (ASTM C185)	22	22	22	22	22	22	22
Mínimo en %		16	16	16	16	16	16	16
Requisitos físicos opcionales								
Endurecimiento inicial, penetración final, mínima en %	NTG 41014 h4 (ASTM C451-08)	50	50	50	50	50	50	50
Resistencia a la compresión, MPa [psi], mín ^o a 28 días	NTG 41003 h4 (ASTM C 109)	—	—	—	28 [4060]	—	22 [3190]	—
Contracción por Secado, %	NTG 41014 h8 (ASTM C596)	N	N	N	N	N	N	N

Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas COGUANOR NTG 41095, (2018).

Beneficios de estabilización de suelos con Cemento Hidráulico

Progreso UGC



• Mayor resistencia:

Los suelos estabilizados con material con Cemento Hidráulico aumentan la resistencia del suelo natural después de haber sido homogenizado y compactado. Según la norma ASTM D 1633, la resistencia que alcanza un suelo estabilizado con cemento hidráulico es para sub bases de 2.40 MPa / 24.5 kg/cm² y para bases es de 3.50 MPa / 35.7 kg/cm². Tabla 307-3 Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puente de Guatemala.

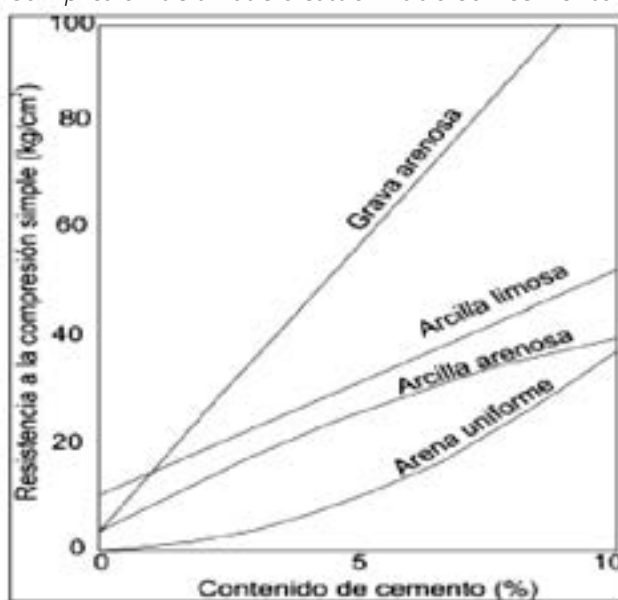


• Aplicación en diversos tipos de suelo:

Se puede utilizar en los suelos granulares y finos, como indica la Tabla No. 6 de este Manual, según la norma AASHTO M 145, estos suelos están comprendidos dentro de los grupos A-2, A-3 y A-4 (arenas y gravas finas).

En la figura siguiente se puede observar el incremento en la resistencia que tienen los materiales (arena, arcilla arenosa, arcilla limosa y grava arenosa) en función del porcentaje de cemento aplicado en la estabilización de suelos.

Figura 17. Incremento en la resistencia a compresión de un suelo estabilizado con cemento



Centro de Investigación y Desarrollo -CID-, Cementos Progreso, (2023).

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON **CONGLOMERANTE HIDRÁULICO TERRAFORTE**



Fuente: Cementos Progreso, (2023).

El Terraforte es un conglomerante hidráulico para carreteras compuesto de Clinker, adiciones minerales y reguladores de fraguado. Está diseñado para aglutinar o conglomerar los suelos para mejorar sus características mecánicas según el tipo esfuerzo y cargas de tráfico a los que sea expuesto.

El terraforte se rige por la Norma Técnica Guatemalteca -NTG 41098-, que tomó como base de la norma UNE EN13282, el cual tiene como objeto establecer los requisitos y especificaciones de los conglomerante hidráulicos que sean utilizados en estabilización de suelos.

Tipos de conglomerantes

Los conglomerantes hidráulicos para carreteras básicamente deben cumplir con los siguientes criterios, según su clasificación:

1. De endurecimiento **normal** IF (fraguado inicial) ≥ 150 minutos
2. De endurecimiento **rápido** IF (fraguado inicial ≥ 90 minutos*

Beneficios de la estabilización de suelos con Terraforte



- **Aumentar la resistencia a la compresión:** según la norma ASTM D 1633, los suelos estabilizados con Terraforte alcanzan una resistencia a los siete (7) días de 2.40 MPa para una sub base y de 3.50 MPa para una base. Utilizando Terraforte previo a un diseño estructural, es posible alcanzar resistencias de 12.5 MPa, si se incorpora material granular.



- **Disminuir la susceptibilidad al agua:** el suelo estabilizado con Terraforte aumenta la impermeabilización. Es de suma importancia tomar en cuenta que, para que la escorrentía generada por las aguas pluviales pueda drenar adecuadamente y aumentar el tiempo de vida útil del suelo estabilizado, la estructura de pavimento debe poseer un sistema de drenado de aguas, constituida por pendientes que van del centro del pavimento, con inclinación no menor al 3%, dirigida hacia cunetas que puedan trasladar las aguas captadas hacia un punto de desfogue.



- **Aumentar la durabilidad ante los efectos de erosión y fatiga:** la estabilización con Terraforte disminuye los efectos adversos generados por la erosión que derivados por la escorrentía de aguas pluviales y la fatiga generada por los esfuerzos superficiales provocados por el flujo vehicular. El tiempo de vida útil puede ser aproximadamente 6 años.



- **Aumentar la trabajabilidad:** debido al bajo calor de hidratación y el tiempo de fraguado del Terraforte, el periodo de trabajabilidad en el proceso de estabilización aumenta.



- **Aprovechar el suelo existente:** al utilizar Terraforte como material estabilizante, se podrá utilizar el suelo existente en el proyecto, siempre que el suelo se encuentre según la AASHTO M 145 en los grupos A-2, A-4, A-5 (arenas o gravas finas) con índice de plasticidad no mayor a 15%. Si el índice de plasticidad es mayor se recomienda utilizar Hidróxido de Calcio.



- **Eliminar o disminuir la explotación de bancos de préstamo:** debido que al utilizar Terraforte como estabilizante se aprovecha el suelo existente en un proyecto, se elimina o disminuye la explotación de material natural en un banco de préstamo.



- **Disminuir el transporte de materiales de préstamo:** al utilizar el suelo existente en un proyecto y disminuir la explotación de bancos de material para realizar sustituciones directas de suelo, el uso de maquinaria para el trasiego de material disminuye, optimizando el tiempo y recursos del proyecto.



- **Disminuir Huella CO2:** debido al contenido de Clinker y el uso de adiciones minerales, se disminuye la huella de carbono, lo cual es de beneficio para el medio ambiente.

Ventajas Técnicas de la estabilización de suelos con Terraforte

Según la guía técnica de Pavimentos UNICAPA del Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso, las ventajas técnicas de usar Terraforte como estabilizante o pavimento UNICAPA son las siguiente:

- Permitir rehabilitar una calle de terracería en malas condiciones, mejorando las características mecánicas y aumentando la capacidad de soporte.
- No se realiza trasiego de material de sustitución.
- Habilita carriles individuales
- La apertura al tránsito es inmediata.
- Se reutiliza el material de la rasante.
- Amigable con el medio ambiente.
- Disminución de mantenimiento o intervenciones correctivas.
- Puede alcanzar resistencias de una base en una estructura de pavimento.

Los suelos que pueden ser tratados con el material estabilizante Conglomerante Hidráulico TERRAFORTE, deben cumplir con las características siguientes:

Tabla 12. Condiciones del uso de Terraforte

Características del suelo	Porcentaje
Índice de plasticidad	25% máximo
Porcentaje pasa tamiz No. 20	30% máximo
Porcentaje retenido en tamiz No. 4	4.2% máximo
Tamaño máximo de partículas gruesas	2.0 pulgadas máximo

Fuente: Centro de Investigación y Desarrollo -CID-, Cementos Progreso, Guía Técnica Pavimentos UNICAPA, (2019).

Se recomienda utilizar Hidróxido de Calcio Horcalsa, si los suelos presentarán porcentajes mayores de plasticidad y material fino.

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON **HIDROVIAL+**



Fuente: Cementos Progreso, (2023).

El Hidróxido de Calcio Hidrovial+ es un estabilizante que se obtiene a partir de racionar con agua la cal viva produce una reacción exotérmica. Por lo tanto, la fabricación de Hidrovial+, comprende dos procesos químicos: Calcinación e Hidratación, los cuales van asociados las operaciones de transporte, trituración y pulverización de la caliza, además de la separación por aire y el almacenamiento adecuado de la cal obtenida para evitar los procesos de carbonatación.

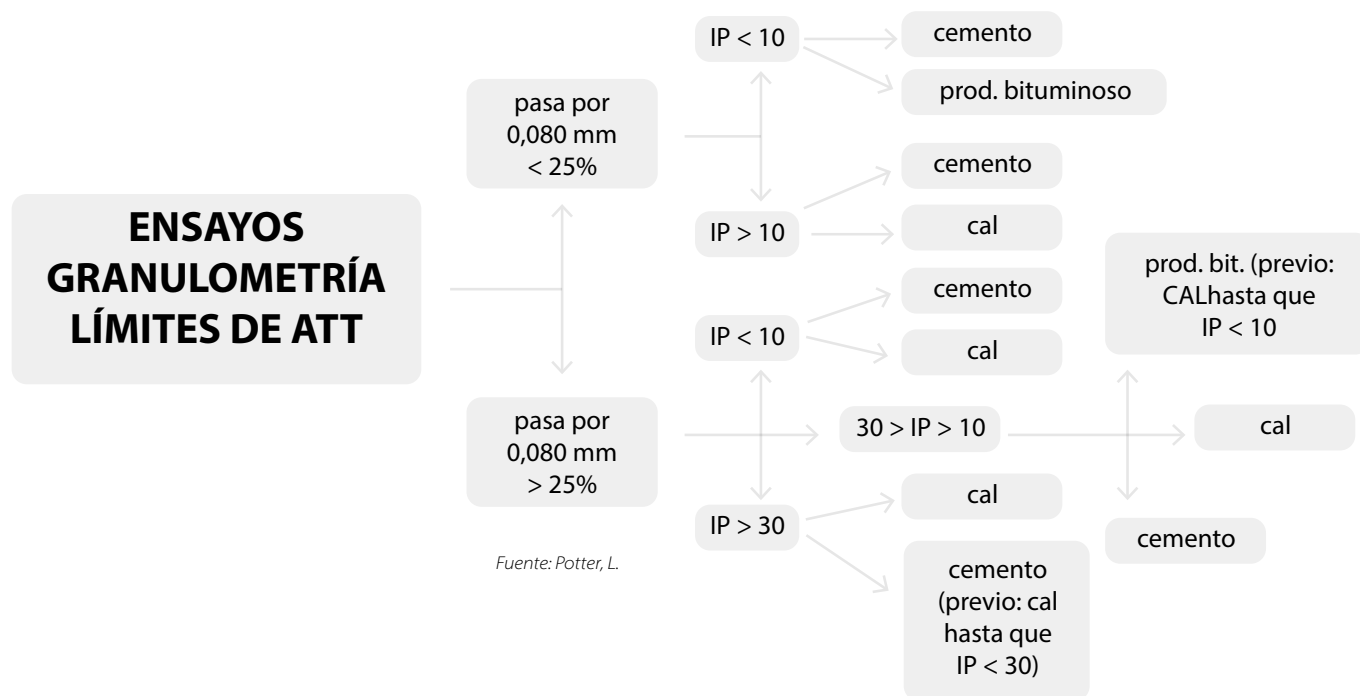
Cumple con la norma AASHTO M 216 (ASTM C 977) ya que el Óxido de Calcio disponible es de 67%.

El Hidróxido de Calcio Hidrovial+, como método de estabilización de suelos, especialmente arcillosos, es una de las alternativas más eficaces para el mejoramiento de los suelos que son susceptibles a los cambios volumétricos de contracción y expansión derivado de la humedad que el suelo contenga. Estos cambios volumétricos provocan en una estructura de pavimento, agrietamiento, deformación, baja resistencia, etc.

La incorporación de Hidróxido de Calcio Hidrovial+ a este tipo de suelos, cambia las propiedades químicas, físicas y mecánicas, brindando estabilidad permanente por los cambios volumétricos mencionados, aumenta la resistencia del suelo, mejora la permeabilidad, compresibilidad, trabajabilidad, reduce la plasticidad. Cabe mencionar que todas estas modificaciones que obtienen un suelo estabilizado con Hidróxido de Calcio Hidrovial+, son permanentes y aumenta con el tiempo, por lo que, el suelo no volverá a tener las características inadecuadas que inicialmente poseía, antes de dosificarlo con el material estabilizante.

Para evaluar el tipo de estabilizante a utilizar (Cemento, Conglomerante Hidráulico Terraforte o Hidróxido de Calcio Hidrovial+) se debe realizar los estudios de suelo correspondientes y de acuerdo a los resultados, se aplicará es estabilizante recomendado. La tabla siguiente indica el estabilizante que se debe utilizar, de acuerdo a los estudios de suelo realizados.

Figura 18. Método para estimar el tipo de estabilizador para un suelo



Se recomienda tomar en cuenta los requisitos del Secretaría de Integración Económica Centroamericana -SIECA-, en su Manual de Mantenimiento de Carreteras el cual se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 13. Requisitos de los suelos a estabilizar

Estabilizador	IP	Pasa Tamiz 0.075mm (No. 200)	Contenido de arcilla (< 0.005 mm)	Materia orgánica
Cal	$\geq 10\%$	$> 25\%$	$> 10\%$ en peso	$\leq 1.5\%$ en peso
Cal y/o Cemento	$10 < IP < 20$	$< 10\%$	$\leq 15\%$ en peso	$\leq 1.5\%$ en peso

Fuente: Secretaría de Integración Económica Centroamericana, SIECA. (2010).

Según el documento de estabilización de suelos de la PCA, los procedimientos existentes para la dosificación de Cal en el proceso de estabilización son los siguientes:

- 
 - **Procedimiento de Eades and Grim:** consiste en determinar el porcentaje adecuado que permita al suelo arcilloso alcanzar un pH de 12.4.
- 
 - **Procedimiento de Illinois:** este procedimiento es aplicable en la estabilización de bases, subbases y subrasantes. El objetivo de la estabilización de bases y subbases es aumentar la resistencia a la compresión libre, mientras que la estabilización de subrasantes es disminuir el Índice de Plasticidad (IP) del suelo.
- 
 - **Procedimiento Oklahoma:** se puede considerar como una combinación del método de Eades and Grim y del método de Illinois, por lo cual, el objetivo es alcanzar un pH de 12.4 y disminuir el Índice de Plasticidad.
- 
 - **Procedimiento del South Dakota:** consiste en alcanzar un pH de 12.4 mediante el método de Eades and Grim y mejorar la resistencia del suelo, por medio del ensayo de Relación de Soporte California -CBR-.
- 
 - **Procedimiento Thompson:** es el proceso más utilizado, debido que se base diferentes métodos o ensayos, por ejemplo: el índice de plasticidad, la resistencia a compresión, densidad seca máxima, etc.

De acuerdo a los objetivos del tratamiento del suelo, el estabilizante Hidrovial+ fabricado a base de Hidróxido de Calcio, puede cumplir con el tratamiento de suelos mejorados y suelos estabilizados.

- 
 - **Suelo Mejorado:** es un suelo que combinado con el material estabilizante persigue mejorar las características de plasticidad y de excesiva humedad natural del suelo, mejorar expansividad del suelo y la capacidad soporte. Según el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, el tratamiento de un suelo tiene un periodo de vida a corto plazo y puede ser realizado con los objetivos siguientes.
 1. Secar el suelo natural por excesiva humeada.
 2. Facilitar la compactación del suelo.
 3. Mejorar la trabajabilidad del suelo.
 4. Preparar el suelo para un tratamiento posterior.
- 
 - **Suelo Estabilizado:** el objetivo de estabilizar un suelo es mejorar sus propiedades mencionadas en el suelo mejorado y aumentar su capacidad soporte y resistencia mecánica.

De acuerdo al Manual de Estabilización de suelos del IECA, la estabilización de un suelo se puede realizar con cemento si el suelo posee bajo índice de plasticidad, de lo contrario si el suelo posee altos índices de material fino y cohesivo debe utilizarse Hidróxido de Calcio Hidrovial+ o realizar un tratamiento mixto, primero Hidróxido de Calcio Hidrovial+ para disminuir humedad y plasticidad y luego Cemento para aumentar la capacidad de soporte. Este doble tratamiento de se puede evitar utilizando Conglomerante Hidráulico Terraforce.

Proceso de estabilización de suelos con Hidrovial+



- **Secado:** El secado de un suelo mediante el proceso de aplicación de Hidrovial+, consiste en la absorción de la humedad y la evaporación del agua generada en la reacción exotérmica de Hidrovial al entrar en contacto con el suelo húmedo. Según la Especificaciones técnicas generales para el tratamiento de suelos con cal, de la Ge4stión de Infraestructura de Andalucía, (2010), el suelo húmedo tratado con el 1% de cal puede disminuir entre el 4% y 5% la humedad. Este porcentaje puede variar, según la dosificación aplicada y previamente recomendada por los análisis de laboratorio.



- **Modificación:** Según el Manual de Estabilización de suelo tratado con cal, de la National Lime Association, los suelos húmedos arcillosos posteriormente del proceso de sacado mejoran la granulometría, transformando el material en un suelo sólido y con mayor facilidad de disgregación, disminuye la plasticidad y los cambios de contracción y expansión, y aumenta la trabajabilidad del suelo.



- **Estabilización:** Un suelo estabilizado con Hidróxido de Calcio Hidrovial+, es el suelo que, al ser mezclado con este material estabilizante, cambia sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, mejora el pH del suelo aumentándolo por arriba de 10.5. Para determinar la dosificación adecuada de Hidróxido de Calcio Hidrovial+ se realiza mediante la estimación realizada por la prueba de Eades y Grim (**ASTM D 6276**) y por el método de Mecánica de Suelos, realizando los ensayos de Granulometría (**AASHTO T 88, AASHTO T 311, ASTM D 6913, ASTM D 7928**) y Límites de Atterberg (**AASHTO T 89, AASHTO T 90, ASTM D 4318**).

Beneficios de la estabilización de suelos con Hidróxido de Calcio HIDROVIAL+



- **Reducir la humedad del suelo:** como se hizo mención en el párrafo “Secado”, la aplicación de Hidróxido de Calcio Hidrovial+ en suelos con humedad excesiva, disminuye considerablemente. La humedad que se quiera alcanzar dependerá del resultado indicado en el ensayo Proctor (Humedad Optima), y la cantidad de Hidróxido de Calcio Hidrovial+ que se necesite, dependerá de la relación entre el índice de plasticidad, de acuerdo al ensayo de Límites de Atterberg y el porcentaje que pasa el tamiz 40 en el ensayo de granulometría, ver la carta de plasticidad en la figura No. 19.



- **Mejorar la granulometría:** el diámetro de las partículas del suelo arcilloso mezclado con el Hidróxido de Calcio Hidrovial+, varían, lo cual provoca que la homogenización del suelo sea adecuada, reduciendo los vacíos existentes y aumentando la permeabilidad del suelo estabilizado.



- **Aumentar la impermeabilidad:** la mezcla de un suelo fino y el Hidróxido de Calcio Hidrovial+, disminuye la cantidad de poros existentes, evitando el paso de agua a través de ellos a excepción del paso lento del agua por capilaridad. Este efecto del Hidróxido de Calcio Hidrovial+ en un suelo fino hace que el suelo estabilizado se comporte como uno sólido, evitando la retención de líquidos y por consiguiente los cambios volumétricos provocados por la humedad y cambios de temperatura.



- **Mejorar la trabajabilidad:** la aplicación adecuada de Hidróxido de Calcio Hidrovial+ en los suelos con altos índices de plasticidad, brindan mayor tiempo de trabajabilidad y hacen que los equipos y/o maquinaria que ejecuta el proyecto pueda distribuir y conformar de mejor forma la mezcla en el área que se estabilizará.



- **Eliminar o disminuir la plasticidad del suelo:** el Hidróxido de Calcio Hidrovial+ se recomienda aplicarlo en suelos con índices de plasticidad mayores al 10% como indica las tablas de las normas **AASHTO M 145** suelos del grupo A-5, A-6, A-7 y según el **Sistema Unificado de Calcificación de Suelos (S.U.C.S)** suelos del grupo MH, CH, OH.



- **Eliminar los cambios volumétricos (expansión y contracción):** el índice de expansión y contracción de un suelo está determinado según **Kansas Highway Commission** de la forma siguiente:

Tabla 14. Clasificación de la expansión de un suelo según el índice de plasticidad

IP	Clasificación del potencial de expansión
0 - 15	Bajo
15 - 35	Medio
35 - 55	Alto
> 55	Muy alto

Fuente: American Society for Testing and Materials, ASTM D 4193.

Tabla 15. Índice de contracción y potencial de expansión.

(%) IC=LL-LC	Clasificación del potencial de expansión
< 20	Bajo
20 - 30	Medio
30 - 60	Alto
> 60	Muy alto

Fuente: American Society for Testing and Materials, ASTM D 4193



- **Aumentar la resistencia:** La resistencia de un suelo estabilizado con Hidróxido de Calcio Hidrovial+ puede alcanzar valores según la norma ASTM D 5102, de 1.340 MPa para sub bases y 2.00 MPa para bases en un tiempo de 28 días, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 16. Resistencia a la compresión no confinada.

Estabilizador	Resistencia mínima a la compresión		Edad en días	Especificación
	Sub-base	Base		
Cal	14.3 Kg/cm ²	20.4 Kg/cm ²	28	ASTM D 5102
Cal - puzolana	24.5 Kg/cm ²	35.7 Kg/cm ²	7	ASTM C 593
Cal - cemento - puzolana	24.5 Kg/cm ²	35.7 Kg/cm ²	7	ASTM D 1633
Cemento- puzolana	24.5 Kg/cm ²	35.7 Kg/cm ²	7	ASTM D 1633
Cemento	24.5 Kg/cm ²	35.7 Kg/cm ²	7	ASTM D 1633

Fuente: Dirección General de Caminos de Guatemala. (2001)

Asimismo, según la norma ASTM D 5102 mencionada en el Manual Centroamericano de Mantenimiento de carreteras, la resistencia a la compresión (mínima) a los siete (7) días debe ser la siguiente:

Tabla 17. Resistencia a compresión

Mezcla para la estabilización	Normativa	Resistencia a la compresión (mínima)
Cal / Suelo	ASTM D-5102	7 Kg/cm ² a los 7 días

Fuente: Secretaría de Integración Económica Centroamericana -SIECA-, (2010).

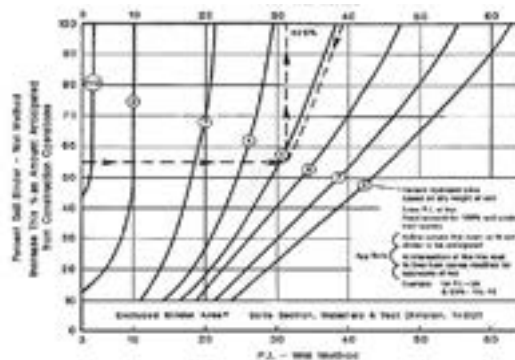
Dosificación de material

Para determinar el porcentaje adecuado de Hidróxido de Calcio Hidroviál+ que se utilizará en la estabilización, se recomienda realizar lo siguiente:

- **Ensayos de granulometría AASHTO T27 T88 y ASTM D422:** de acuerdo al tamaño de las partículas que constituyen el suelo y el porcentaje en peso total de la cantidad de granos de diferente tamaño que contiene el suelo analizado, utilizaremos el porcentaje (%) en peso que pasa el tamiz No. 40, el cual posee una abertura de 425µm.
- **Ensayo de límites líquido, plástico e índice de plasticidad LIMITES DE ATTERBERG, AASHTO T89 y T90:** según los resultados obtenidos al realizar el análisis, utilizaremos el porcentaje (%) del índice de plasticidad del suelo.

Al tener los porcentajes anteriormente mencionados, se ingresan en la carta de plasticidad, para determinar la cantidad necesaria para realizar la estabilización. A continuación, se muestra la imagen de la carta de plasticidad.

Figura 19. Cantidades recomendadas de Cal para la estabilización de subrasantes y bases



Fuente: Especificaciones estándar para materiales de transporte y métodos de muestreo y prueba, vigésima sexta edición, (2006).

Al obtener el porcentaje (%) adecuado de Hidroviál+, procedemos a realizar el ensayo siguiente:

- **Ensayo Proctor AASHTOT-180:** se utilizará el peso volumétrico seco que se obtienen al realizar el ensayo Proctor y el porcentaje de estabilizante determinado por medio de la carta de plasticidad, para calcular el volumen en Kg/m³ requerido en la estabilización de acuerdo a la fórmula propuesta por el Manual para Inspectores de Suelos Estabilizados de la Portland Cement Association, (1995):

$$VE = \frac{Dm}{(1 + \% \text{ de material})} = Dm - VE = \text{Cantidad} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Donde:

- **VE:** Volumen de estabilizante
- **Dm:** Peso volumétrico seco (Proctor Modificado)
- **%M:** Porcentaje de material que se aplicará (carta de plasticidad)

El resultado nos indicará la cantidad de material en Kilogramos por metro cúbico (Kg/m³) de estabilización.

PROCESO TÉCNICO DE ESTABILIZACIÓN



El proceso técnico para la correcta estabilización de suelos, es el mismo cuando utilizamos materiales estabilizantes como Cemento UGC, Conglomerante Hidráulico Terraforte e Hidróxido de Calcio Hidrovial+. La diferencia que existe entre cada uno, dependerá de las especificaciones del proyecto, las cuales dependerán del uso del área a estabilizar, por ejemplo: plataformas, explanadas, urbanizaciones, carreteras de primer, segundo y tercer orden, rellenos, cimentaciones, etc.

Cada área tendrá un uso distinto, por lo cual, es necesario tomar en cuenta, la granulometría de los suelos, el índice de plasticidad, el porcentaje óptimo de humedad, el porcentaje de densidad máximo de compactación, la resistencia a determinado tiempo, entre otros.

El proceso para realizar una adecuada estabilización es el siguiente:

ESCARIFICACIÓN PARCIAL DEL SUELO

Con el objetivo de facilitar el proceso de escarificación y/o pulverización, se recomienda humedecer uniformemente previamente a realizar el proceso.

Según la sección 300 del libro de Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de Guatemala, la escarificación consiste en la eliminación de toda materia orgánica y la disgregación la superficie de suelo. La disgregación se realizará de acuerdo a las especificaciones del proyecto.

El espesor de la sub rasante que se va a escarificar no debe exceder los 20 cm.

PULVERIZACIÓN PARCIAL DEL SUELO

Posteriormente a haber realizado la escarificación del suelo, según las indicaciones establecidas en el diseño del proyecto, se recomienda pulverizar las partículas extraídas. Este proceso se realiza para disminuir las partículas que contengan diámetros mayores o iguales a las 76.2 mm y que puedan ser pulverizados, a fin de que, el material tenga mayor cohesión al ser homogenizado con el material estabilizante.

El proceso de escarificación y/o pulverización se puede realizar con la maquinaria siguiente:

- **Motoniveladora:** en el mercado existen diferentes marcas y capacidades, de referencia y como ejemplo se menciona una motoniveladora de 140 HP.

Escarificación o Pulverización de un suelo con Motoniveladora



Fuente: Complejo Industrial, Michatoya Pacífico. Escuintla, Guatemala, Cementos Progreso: Tol, L. (2023).

- **Recicladora de caminos:** Dependiendo de las capacidades de la empresa ejecutora, se puede utilizar una recuperadora de caminos como opción, la cual facilita el proceso de ejecución del proyecto. Se recomienda como ejemplo, una con capacidad de 8 TN.

Recuperadora de caminos para escarificación u homogenización de suelos



Fuente: Carretera Interamericana CA-1 Occidente, Guatemala, Cementos Progreso: Tol, L. (2023).

COLOCACIÓN DE MATERIAL ESTABILIZANTE

El material estabilizante debe ser uniformemente extendido en el área del proyecto. La cantidad que se aplicará es la especificada en el diseño de estabilización, de acuerdo a los ensayos de suelos realizados previamente. La aplicación del material estabilizante se podrá realizar por medio de un camión esparcidor y/o por medio de colocación de sacos distribuidos de acuerdo a la cantidad requerida por metro cuadrado. Ambos casos son válidos en la ejecución del proyecto.

La Secretaría de Integración Económica de Centro América, recomienda remover, raíces, basura y agregados mayores de 75 mm.

Figura 22. Aplicación de Hidróxido de Calcio Hidrovial+ con camión esparcidor



Fuente: Complejo Industrial, Michatoya Pacífico. Escuintla, Guatemala. Cementos Progreso: Tol, L. (2023).

Figura 31. Aplicación de Hidróxido de Calcio Hidrovial+ por medio de sacos de 25 Kg.



Fuente: Urbanización Residencial Praderas del Bambú, San Raymundo, Guatemala. Ruiz, L (2023).

No se recomienda descargar el material estabilizante en un solo “volcán” para realizar posteriormente la extensión con motoniveladora.

HOMOGENIZACIÓN DE SUELO Y EL **MATERIAL ESTABILIZANTE**

El material estabilizante deberá ser mezclando homogéneamente por toda el área escarificado. Dependiendo de las especificaciones del proyecto, será necesario realizar nuevamente otra pulverización y homogenización después del periodo del fraguado. Este proceso ayudara a obtener una nueva y mejor curva granulométrica uniformemente distribuido.

El proceso de homogenización del suelo y el material estabilizante se puede realizar por medio del Ripper o dientes de la Motoniveladora. Este proceso se puede realizar con la maquina Recicladora.

Figura 24. Homogenización y conformación de un suelo y un material estabilizante.



Urbanización Desarrolladora San José, San José Pinula, Guatemala Fuente anónima (2023).



APLICACIÓN DE AGUA

Antes de realizar el proceso de compactación del pavimento, se deberá revisar el contenido de humedad, con el propósito de comparar y cumplir con ± 2 o 3% (dependiendo de las condiciones climatológicas) de la humedad óptima de compactación del ensayo Proctor AASHTO T 180, realizado previamente en laboratorio; además, se recomienda realizar zanjas o calas de observación en la mezcla suelta para asegurarse que el mezclado del suelo, estabilizante y agua sea eficiente y que la humedad sea uniforme en todo el espesor tratado.

Figura 25: Aplicación de agua en una mezcla de suelo y estabilizante.



Fuente: Urbanización y plataformas, Complejo Industrial Michatoya Pacífico, Escuintla, Guatemala. Cementos Progreso: Tol, L. (2023).

MADURACIÓN

Según el Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras del SIECA (2010), se recomienda realizar la estabilización de suelos altamente arcillosos, en dos etapas, la cual consiste en una mezcla y pulverización preliminar dejando que madure en un tiempo de tres o más días (a criterio del Ingeniero Residente) en este tiempo la cal reaccionará y pulverizará químicamente las partículas altamente arcillosas, posteriormente se mezclará y pulverizará nuevamente, antes de realizar la compactación final.

MEZCLA Y PULVERIZACIÓN

Esta es la mezcla y pulverización final del suelo y el estabilizante combinado posteriormente al tiempo de maduración. Esta mezcla y pulverización se debe realizar hasta que el 100% del material pase el Tamiz de 25 mm y al menos el 60% pase el tamiz No. 40.

Figura 26. Mezcla y pulverización final de suelo y estabilizante



Fuente: Urbanización y plataformas, Complejo Industrial Michatoya Pacífico, Escuintla, Guatemala. Cementos Progreso: Tol, L. (2023).

Otros ensayos que se pueden realizar in-situ para evaluar la calidad de la estabilización son los siguientes:

- Control de humedad optima
- Densidad máxima del suelo
- Probetas a compresión, evaluadas en laboratorio a siete o veintiocho días.

Figura 27. Control de calidad en mezclado y pulverización final



Fuente: Urbanización y plataformas, Complejo Industrial Michatoya Pacífico, Escuintla, Guatemala. Cementos Progreso: Tol, L. (2023)..

COMPACTACIÓN

El proceso de compactación del suelo mezclado con estabilizante debe realizarse inmediatamente después de la mezcla y pulverización final; asimismo, debe ser compactada a la densidad requerida por las especificaciones del proyecto.

La compactación en una sola capa puede hacerse con rodillo pesado, liso vibratorio y rodillo pesado de neumáticos. Puede usarse también una combinación de rodillos de pata de cabra y de neumáticos livianos, seguida de una compactación final con rodillo liso pesado o compactadora pesada de llantas neumáticas.

Figura 26. Compactación con vibro compactador pata de cabra y rodo vibratorio



Fuente: Urbanización y plataformas, Complejo Industrial Michatoya Pacífico, Escuintla, Guatemala. Cementos Progreso: Tol. L. (2023).

CURADO

Previo a colocar alguna otra capa sobre la subrasante estabilizada, se recomienda dejar endurecer para evitar cualquier tipo de ahuellamiento en la superficie. Este tiempo de endurecimiento puede ser de un máximo de siete días (a criterio del ingeniero residente), durante este tiempo, el material estabilizado debe ser regado periódica y uniformemente para mantenerlo húmedo.

Figura 27. Curado de un suelo estabilizado con Hidrovial+



Fuente: Urbanización Residencial Praderas del Bambú, San Raymundo, Guatemala. Ruiz, L. (2023).

EJEMPLO DE PROYECTOS EJECUTADOS

1. Carretera Interamericana, CA-1 Occidente, Tecpán Chimaltenango, Guatemala.

Condición del proyecto:

- **Tipo de suelo:** arenas, gravas y limos.
- **Estructura de pavimento estabilizada:** sub base
- **Objetivo de aplicación:** absorción de humedad excesiva
- **Dosificación de estabilizante:** 2% a 3%
- **Deformación alcanzada:** 1.2%
- **Material estabilizante utilizado:** Cemento UGC e Hidrovial+
- **Año de ejecución:** 2023.



Fuente: Cementos Progreso: Tol, L. (2023)

2. Ruta Departamental, El Boquerón - La Garita, San Pedro Nécta, Huehuetenango, Guatemala.

Condición del proyecto:

- **Tipo de suelo:** arcilla
- **Estructura de pavimento estabilizada:** subrasante
- **Índice de plasticidad:** 31%
- **Dosificación de estabilizante:** 3.5%
- **Material estabilizante:** Hidróxido de Calcio
- **Año de ejecución:** 2021-2022



Fuente: Cementos Progreso: Rodríguez, G. (2023)

3. Plataformas y Urbanización Residencial, San José Pinula, Guatemala.

Condición del proyecto:

- **Tipo de suelo:** arcilloso
- **Estructura de pavimento estabilizada:** subrasante
- **Dosificación de estabilizante:** 2%
- **Material estabilizante:** Hidróxido de Calcio
- **Año de ejecución:** 2022



Fuente: Cementos Progreso, (2023)

4. Complejo Industrial Michatoya Pacífico, Km-72, Escuintla Guatemala.

Condición del proyecto:

- **Tipo de suelo:** grava limosa con arena color beige
- **Estructura de pavimento estabilizada:** base granular
- **Índice de plasticidad:** 0
- **Humedad óptima:** 6.8%
- **Densidad máxima obtenida:** 2128 kg/m³
- **Dosificación de estabilizante:** 3%
- **Material estabilizante:** Hidrovial+
- **Resistencia obtenida a los siete días:** 1180 PSI
- **Nota:** El material estabilizante aumento la resistencia de la base, sin necesidad de aplicar material cementico.



Fuente: Cementos Progreso: Tol, L. (2023)

5. Pista de rodaje del Aeropuerto Internacional La Aurora, ciudad de Guatemala.

Condición del proyecto:

- Tipo de suelo: areno limo arcilloso con grava
- Capa mejorada: sub base
- Humedad natural: 21%
- Humedad óptima: 9 %
- Dosificación estabilizante: 1.57%
- Material estabilizante: Hidrovial+
- Resistencia a la compresión no confinada: 2.0 MPa
- CBR al 95% de compactación:



Fuente: Cementos Progreso: Tol, L. (2024)

6. Estabilización de la capa de base en RN-08 Catarina - El Rodeo, San Marcos, Guatemala.

Condición del proyecto:

- Tipo de suelo: material reciclado asfáltico
- Capa mejorada: base
- Dosificación estabilizante: 2.5%
- Material estabilizante: Hidróxido de Calcio
- Resistencia a la compresión no confinada: 2.85 MPa a los 7 días
- Resistencia a la compresión no confinada: 5.05 MPa a los 28 días



Fuente: Cementos Progreso: Tol, L. (2024)



REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2006). Standar Specifcatons for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2010). Annual Book of ASTM Standars.
- Cementos Progreos, Centro Tecnológico CETEC. (2023).
- Cementos Progreso, Centro de Investigación y Desarrollo. (2019). Guía Técnica Pavimentos Unicap. Guatemala.
- Centro Universitario de Occidente, Universidad de San Carlos de Guatemala. (2006). Mecánica de Suelos. Quetzaltenango.
- Diccionario de la Construcción. (2023). Obtenido de <https://www.diccionariodelaconstruccion.com/procesos-productivos-obra-civil/firmes-y-pavimentos/capacidad-portante>
- Geotécnia. (2018). Obtenido de <https://geotecniafacil.com/ensayo-cbr-laboratorio/>
- Geotechnical Consulting. (2017). Geotecnia y Mecanica de Suelos. Obtenido de <https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/cloruros-sulfatos/>
- Gestión de Infraestructura de Andalucía, S. (2010). aopandalucia.es. Obtenido de https://www.aopandalucia.es/inetfiles/area_tecnica/calidad/Recomendaciones_y_pliegos_varios/Recomendaciones_tratamiento_suelos_con_cal_Version_Diciembre_2010.pdf
- HORCALSA, Cementos Progreso. (2022). Hoja Técnica de Hidróxido de Calcio. Sanarate, El Progreso, Guatemala.
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. (2003). Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal. Madrid, España.
- Juárez Badillo, Rico Rodriguez. (2005). Fundamentos de la Mecánica de Suelos. México.
- Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda. (2001). Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes. Guatemala.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Ministerio de Obras Publicas Dirección de Vialidad, Gobierno de Chile. (2008). Manula de Carreteras, Especificaciones y Metodos de Muestreo, Ensayo y Control.
- National Lime Association. (2004). Manual de Estabilización de Suelos Tratado con Cal.
- Portland Cement Association. (2003). Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime-A Critical Review of Literature.
- Rivera, Jhonathan F. (Junio de 2020). Estabilización Química de Suelos, Materiales Convencionales y Activados Alcalinamente. Obtenido de https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/2530/3417#info
- Secretaría de Integración Económica Centroamericana. (2010). Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras con Enfoque de Gestión de Riesgo y Seguridad.
- Universidad de los Andes, Mérida Venezuela. (2017). Contenido de Materia Orgánica en Suelos. Venezuela: Merida.
- Universidad Tecnológica de Chile. (s.f.). Obtenido de http://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Construccion/G01_Limites_de_Atterberg.pdf

Elaborador por:

Tol, Luis – Comercial Cal, Predosificados y Pulverizados, Cemento Progreso.

Asesorado por:

Administración del Conocimiento.

Infraestructura y Pavimentos, Centro de Investigación y Desarrollo.

“Todos los derechos reservados”

HORCALSA®



