

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**



**“PROCEDIMIENTO PARA MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON
CENIZA VOLCÁNICA Y CAL PARA CUMPLIR CON LOS CRITERIOS DE
ACEPTACIÓN QUE MARCA LA NORMA N-CMT-1-01/16”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

PRESENTA:

LUIS GUILLERMO RAMÍREZ BORBÓN

DIRECTOR DE TESIS

DRA. SUSANA PAOLA ARREDONDO REA

CO-DIRECTOR DE TESIS

DR MANUEL DE JESUS PELLEGRINI CERVANTES

Culiacán de Rosales, Sinaloa, a diciembre del 2020



UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por permitirme haber logrado un paso más en mi carrera, por darme la fortaleza y sabiduría para saber enfrentar las pruebas que se me presentaron y aún se me presentan esto haciéndome crecer más como persona tanto como profesional como personalmente.

Le doy gracias a mis padres por el apoyo incondicional que siempre me han dado y por sus palabras de motivación en los momentos donde más lo necesitaba.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Culiacán por haberme permitido formarme como ingeniero civil una profesión que me gusta mucho desempeñar y ahora por culminar en su programa de Maestría de la Ingeniería de la Construcción un proceso que disfruté mucho y me ayudó a desenvolverme en el ámbito profesional.

A mis compañeros de generación, grandes personas con un gran potencial, les agradezco el apoyo brindado y su amistad.

Agradezco a la coordinadora de la maestría por su apoyo y sobre todo por la gran paciencia mostrada en este periodo.

Gracias a mi directora y co-director de tesis por sus aportaciones y por no bajar la guardia ante las condiciones adversas que se presentaron en el desarrollo del proyecto.

Gracias a mi comité evaluador por sus observaciones y comentarios durante el desarrollo de este proyecto las cuales sirvieron para enriquecer en gran medida el proyecto.

DEDICATORIAS

A Dios

Por bendecirme, darme fuerza y sabiduría para culminar este proceso tan importante en mi carrera y en mi formación profesional.

A mi madre

Por ser un ejemplo de dedicación, paciencia, por su apoyo incondicional en esta y en todas las etapas que he vivido, por darme ese consejo cuando estaba a punto de claudicar.

A mi padre

Por ser un ejemplo de rectitud, dedicación, darme ese consejo oportuno, guiarme por el buen camino y por hacerme entender que cada logro propuesto requiere de gran dedicación y empeño.

A Fernanda y Natalia

Por ser uno de mis motores por los cuales quiero superarme en la vida por todo el amor que me muestran siempre.

A Mariana

Claro ejemplo de que a pesar de que todo parece estar en tu contra, las metas y los sueños que te propongas se cumplen a base de esfuerzo, organización, por ser mi apoyo incondicional en este proceso y motivarme día con día.

RESUMEN

La arcilla en los proyectos donde se involucran movimientos de tierras presenta un problema para la construcción por su dificultad para trabajar sobre la misma. Teniendo 2 posibles soluciones, la primera es estabilizar el suelo comúnmente con cal o cemento lo cual su producción genera grandes cantidades de gases de efecto invernadero, la segunda opción sería retirar el material y suministrar material de banco lo cual también implica la emisión de grandes cantidades de efecto invernadero por la maquinaria que se utiliza para la extracción, acarreo y suministro de los materiales.

El proyecto de intervención a realizar tiene como objetivo principal la estabilización de suelos arcillosos utilizando ceniza volcánica y cal como estabilizadores. Con esto se pretende reducir el uso de la cal como uno de los principales estabilizadores de suelos en la construcción de carreteras, por su gran impacto al medio ambiente, así mismo disminuir los costos de producción.

Para realizar el proyecto se realizará una exhaustiva revisión bibliográfica buscando publicaciones donde se agregue ceniza volcánica y cal en diferentes proporciones a una muestra de arcilla, y se medan los parámetros en los que esta adición afecta en forma benéfica a las propiedades ingenieriles de la arcilla así mismo comprobar que la arcilla que los artículos obtienen de esta mezcla cumplen con los parámetro de la norma N-CMT-1-01/16 como criterios de aceptación y así con ceniza volcánica del Volcán de Fuego en Colima y cal convencional determinar el contenido óptimo de cal y ceniza volcánica buscando minimizar el contenido de cal para que la arcilla cumpla con los criterios de la norma antes mencionada.

PALABRAS CLAVE

Arcilla, ceniza volcánica, cal, estabilización.

ABSTRACT

Clay in projects where earthworks are involved presents a problem for construction due to its difficulty in working on it. Having 2 possible solutions, the first is to stabilize the soil commonly with lime or cement which its production generates large amounts of greenhouse effect gases, the second option would be to remove the material and supply bench material which also implies the emission of large quantities greenhouse effect due to the machinery used to extract, transport and supply the materials.

The main objective of the intervention project to be carried out is to stabilize clay soils using volcanic ash and lime as stabilizers. This is to reduce the use of lime as one of the main soil stabilizers in road construction, due to its great impact on the environment, as well as reducing production costs.

To carry out the project, an exhaustive bibliographic review will be carried out, looking for publications where volcanic ash and lime are added in different proportions to a clay sample, and the parameters in which this addition beneficially affects the engineering properties of the clay are measured. Check that the clay that the articles obtain from this mixture comply with the parameters of the N-CMT-1-01 / 16 standard as acceptance criteria and thus with volcanic ash from the Volcan de Fuego in Colima and conventional lime determine the optimal content of lime and volcanic ash seeking to minimize the content of lime so that the clay meets the criteria of the aforementioned standard.

KEYWORDS

Clay, volcanic ash, lime, stabilization.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	10
1.1	PRESENTACIÓN.....	10
1.2	ANÁLISIS SITUACIONAL	11
1.3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	13
2	FUNDAMENTO TEÓRICO	15
2.1	MARCO HISTÓRICO Y CONTEXTUAL	15
2.1.1	MÉTODOS FÍSICOS	17
2.1.2	MÉTODOS MECÁNICOS (COMPACTACIÓN)	19
2.1.3	MÉTODOS QUÍMICOS	19
2.1.4	CONTROL DE CALIDAD	20
2.2	ESTADO DEL ARTE.....	23
2.3	MARCO TEÓRICO.....	29
2.3.1	ARCILLA.....	29
2.3.2	CAL.....	30
2.3.3	CEMENTO.....	31
2.3.4	PUZOLANAS	32
2.3.5	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	33
2.3.6	LÍMITES DE ATTERBERG.....	35
2.4	MARCO LEGAL.....	36
3	PROYECTO DE INTERVENCIÓN	38
3.1	OBJETIVO GENERAL	38
3.1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	38
3.2	JUSTIFICACIÓN.....	38
3.3	METODOLOGÍA.....	40
3.3.1	MATERIALES	40
3.3.2	INFRAESTRUCTURA	40
3.3.3	DESARROLLO DEL PROYECTO	40
3.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
3.4.1	CONTENIDO ÓPTIMO DE CAL Y DISEÑO DE MEZCLAS	46
3.4.2	LÍMITE LÍQUIDO DE LA ARCILLA EN ESTADO NATURAL.....	47
3.4.3	CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA VOLCÁNICA	48
3.4.4	MEZCLA ÓPTIMA DE CENIZA-CAL-ARCILLA	50
3.4.5	FACTIBILIDAD ECONÓMICA	51
4	ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN	54
4.1	PLAN DE ACCIÓN.....	54
4.2	ESTRATEGIAS USADAS PARA PRESENTAR Y PERSUADIR A LOS INVOLUCRADOS EN EL PROYECTO.....	54

5	<i>ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO</i>	55
5.1	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	55
5.2	RECURSOS	56
6	<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	57
6.1	CONCLUSIONES	57
6.2	RECOMENDACIONES	58
7	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de Suelos Expansivos en varias ciudades del país	21
Figura 2 Carta de Plasticidad [13].....	30
Figura 3 Ubicación del predio donde se obtuvo la arcilla	41
Figura 4 Ceniza volcánica del volcán de fuego de Colima	42
Figura 5 Medición de pH en el método de Eades y Grim	43
Figura 6 Límite líquido de la arcilla.....	45
Figura 7 Puntos e interpolación para obtener el contenido óptimo de cal.....	47
Figura 8 Obtención gráfica de límite líquido	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Artículos revisados y parámetros de los mismos	25
Tabla 2 Resultados obtenidos de los diferentes artículos revisados.....	27
Tabla 3 pH respecto a porcentajes de cal	46
Tabla 4 Cantidades de arcilla-cal-ceniza en las mezclas.....	47
Tabla 5 Valores obtenidos en la prueba de límite líquido en arcilla en su estado natural.....	47
Tabla 6 Composición química de la Ceniza Volcánica.....	49
Tabla 7 Granulometría de la ceniza volcánica	49
Tabla 8 Densidad aparente con matraz Le-Chatelier	49
Tabla 9 Comparativa de los componentes activos de la ceniza volcánica.	51
Tabla 10 Valores esperados para la mezcla Ceniza-Cal-Arcilla	51
Tabla 11 Costo directo por metro cúbico de diferentes estabilizaciones.....	52
Tabla 12 Análisis de factibilidad económica (Radio de factibilidad)	53
Tabla 13 Cronograma de actividades	55
Tabla 14 Recursos	56
Tabla 15 Comparativa de costo con métodos tradicionales de estabilización.....	56

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PRESENTACIÓN

Este proyecto pretende desarrollar una alternativa más ecológica para la estabilización de suelos arcillosos, en dicho proceso comúnmente se utiliza cal y cemento, en la alternativa propuesta se utilizará un desecho de la naturaleza el cual es la ceniza volcánica y cal, esta última en proporciones menores a las comúnmente aplicadas.

El impacto ambiental de la construcción de carreteras en la ecología es perjudicial debido a la necesidad de un gran volumen de material de relleno. Cuando el rendimiento en el sitio no es adecuado para la construcción de carreteras, se necesita material prestado que se extrae de un río cercano o se extrae de los pozos circundantes. En lugar de utilizar material prestado, puede ser más económico utilizar suelo in situ siempre que se cumplan los criterios de rendimiento [1].

La estabilización de la arcilla es una alternativa popular para los ingenieros geotécnicos teniendo en cuenta los aspectos económicos de la construcción con suelos arcillosos expansivos siendo los estabilizadores tradicionales, como la cal y el cemento portland los más utilizados [2].

Se propone como agente estabilizador la ceniza volcánica del volcán de fuego en Colima, ya que dicho a dicho material no se le está dando uso alguno y tiene gran capacidad de extracción.

En base a la bibliografía encontrada sobre el tema, y de pruebas de laboratorio se propuso una mezcla de arcilla, ceniza volcánica y cal que cumpla con las características que marca la norma N-CMT-1-01/16 [3], donde el material debe tener un límite líquido máximo del 50%, un valor soporte de california mínimo del 5%, una expansión máxima del 5% y un grado de compactación del $90 \pm 2\%$; y así poderla emplear en el movimiento de tierras, donde sea necesario un material con las características para terraplén.

En base a la mezcla obtenida se realizó un análisis de los costos donde se comparan los métodos de estabilización tradicionales y el de la mezcla propuesta para que también sea tomado en cuenta la factibilidad económica del proyecto.

1.2 ANÁLISIS SITUACIONAL

En el sector de la construcción, particularmente en el movimiento de tierras, los cuales son muy comunes en los desarrollos carreteros e inmobiliarios, generalmente en los predios adquiridos para construir en esta región del centro del estado de Sinaloa, se encuentra estos terrenos en su mayoría con material cohesivo, el cual al tener un cambio de humedad presenta variaciones volumétricas, siendo inestable y difícil de trabajar.

En el ámbito de la geotecnia, tratar con suelos finos saturados y arcillas es un reto y todo un campo de investigación, ya que al realizar obras de infraestructura sobre este tipo de suelos, se corre el riesgo y generalmente tienden a tener grandes deformaciones, cambios de volumen y contracciones, lo cual es un riesgo para cualquier obra civil que se pretenda desplantar sobre ellos [4].

Las exigencias para los suelos en las carreteras requieren en ocasiones, motivado por las elevadas cargas del tránsito, que los ingenieros desperdicien materiales del sitio de construcción que no cumplen la calidad requerida y se ven obligados a introducir en los proyectos costos de transporte de suelos desde canteras, lo que siempre resulta una opción complicada. Esta problemática se resuelve con el mejoramiento de los suelos, mediante diferentes formas de estabilización, al no disponer de nuevas canteras de préstamo; vista por muchos expertos como una solución económica, además amigables con el medio ambiente [5].

Son varias las circunstancias que justifican la utilización de los suelos estabilizados, entre las que se encuentra la gran demanda de un transporte de carretera de calidad, que condiciona una mayor durabilidad de los materiales y estructuras del pavimento bajo un tráfico pesado, cuyo crecimiento e intensidad sigue en aumento. La garantía de un pavimento de buen comportamiento precisa una elevada capacidad de soporte, insensible a los agentes atmosféricos, garantizando la estabilidad del cimiento a largo plazo, a pesar de las incidencias relacionadas con el drenaje o deformaciones originadas por bajas densidades [5]. Además el no considerar estas circunstancias en la construcción de edificios o infraestructura sobre suelos suaves y débiles genera un alto riesgo, debido a los asentamientos diferenciales que se pueden presentar, la alta compresibilidad y su escasa

resistencia al corte razones justificadas por las cuales es importante mejorar los suelos con métodos de estabilización [6].

Por otra parte, la protección del medio ambiente impone grandes limitaciones a préstamos y vertederos, lo que significa un empleo en los rellenos prioritario de suelos locales procedentes de los desmontes, buscando un equilibrio del movimiento de tierras. La reducción de espesores de pavimento, que se logra con una subrasante mejorada, contribuye indirectamente al ahorro de áridos de calidad y del ligante, además del ahorro del transporte de materiales, encarecido por los costos actuales de combustibles. Incluso, el aprovechamiento de los suelos locales mediante estabilización, en muchos casos, compensa el coste del producto estabilizador [5].

Generalmente se utilizan métodos químicos para la estabilización de suelos, esto es, el uso de cementantes tales como el cemento pórtland y la cal, que interactúan como ligantes entre las partículas del suelo a estabilizar [7].

De éstos el más usado es el cemento pórtland, porque provee de propiedades mecánicas estables y está disponible [Lorenzo y Bergado-2006], su uso en cuanto a cuestiones técnicas está justificado, ambientalmente debido a la generación de CO^2 en su fabricación se ha diversificado la investigación con materiales alternativos que funcionen como enlace entre las partículas del suelo para su estabilización.

En la región se utilizan estabilizadores con cal, cemento, o una combinación de ambos. Haciendo un proceso más costoso ya que estos productos no dejan de encarecerse aumentando entre 7.5% y 10% en el caso del cemento [8].

Extraer el material e incorporar material de banco es una alternativa más costosa, también tiene un mayor impacto ambiental por las emisiones de gases de efecto invernadero producidos por los camiones de volteo.

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los suelos arcillosos crean muchos problemas para la construcción de carreteras como son cambios de volumetría con aumentos o disminuciones de humedad y baja capacidad de soporte, por esto deben ser reemplazados o mejorados mediante estabilización para un desempeño satisfactorio [1].

Las erupciones volcánicas se emiten diversos materiales provenientes del interior del corteza terrestre, en cuya composición se encuentran elementos contaminantes al medio ambiente, entre ellos destacan las cenizas que pueden viajar largas distancias por la acción del viento y además son arrastradas por las corrientes hidrológicas naturales, presentes en las zonas donde se depositan sobre el suelo, convirtiéndose de esa manera en factores de contaminación que pueden llegar a perjudicar la salud de las personas que se mantengan en contacto prolongado con ellos. En el volcán de fuego en la ciudad de Colima se encuentra una gran cantidad de ceniza volcánica la cual no es aprovechada de ninguna manera.

El sector de fabricación de cal utiliza una gran cantidad de energía, que representa hasta un 60 % de los costes totales de producción. Los hornos se alimentan con combustibles gaseosos (como gas natural, gas de coque), combustibles sólidos (como carbón, coque o antracita) y combustibles líquidos. Además, se emplean distintos tipos de residuos como combustibles, por ejemplo, aceite, plásticos, papel, harina animal, serrín [9].

El proceso de cocción del clínker es la parte más importante del proceso en lo que respecta a las cuestiones medioambientales clave derivadas de la fabricación de cemento: el consumo energético y las emisiones a la atmósfera. La industria cementera genera emisiones a la atmósfera y al suelo (como residuos) según sea el proceso de fabricación específico. En algunos casos excepcionales pueden llegar a producirse emisiones al agua [9].

Por lo anterior, se propone la utilización de la ceniza volcánica como ayuda para la estabilización de la arcilla y así no utilizar solamente cal en este proceso. Con esto se quiere evitar lo siguiente:

- Desaprovechamiento de un desecho natural, que pueden llegar a perjudicar la salud de las personas.
- Abrir nuevos bancos de extracción y de desperdicio de material.
- Generación de gran cantidad de gases de efecto invernadero por la producción de los estabilizadores tradicionales.
- Generación de gases de efecto invernadero por los camiones de volteo implicados en el retiro y suministro de material.

Es de suma importancia promover la conciencia y las buenas prácticas en todos los involucrados en el movimiento de tierras, como lo son: ingenieros, contratistas, diseñadores, control de calidad; sobre los nuevos avances e investigaciones con las que se cuentan al respecto, en este caso, la utilización del residuo de concreto fresco como agente estabilizador de arcilla, ya que en la actualidad en el estado de Sinaloa no existe una propuesta para la utilización de este residuo; y al mismo tiempo contribuimos con el medio ambiente al disminuir las emisiones de Gases Efecto Invernadero emitidas por la maquinaria pesada tanto en el transporte de material como la empleada en los bancos de extracción y vertido de material, así como la preservación del ecosistema al atenuar la explotación de bancos para la extracción de material, vertederos para los desechos de construcción [10].

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 MARCO HISTÓRICO Y CONTEXTUAL

Las construcciones erigidas por los romanos, chinos, egipcios y mayas, tales como la muralla China, las pirámides de Egipto, las pirámides de Chichén-Itzá, notables y enormes obras, que hoy contemplamos con admiración, son mudos testigos de la atención y conocimientos que se tenían en la antigüedad de las obras de y sobre la tierra. Después de la caída del Imperio Romano y debido a la desorganización social se descuidaron los aspectos técnicos sobre los suelos, teniendo su punto más bajo en el periodo medieval alrededor del 400-1400 AC; siendo hasta los siglos XVII y XVIII, cuando revivió el interés y nuevo impulso a la solución de los problemas de cimentación [11].

Los romanos emplearon la cal en la sub-base de algunas carreteras, concretamente en la famosa Via Appia [12].

A partir de 1925 se inicia el desarrollo más significativo en esta rama de la ingeniería, con la presentación del profesor Karl Von Terzaghi de su libro *Erbaumechanik* (Mecánica de Suelos) en Viena, donde expone una nueva filosofía relativa al suelo presentándolo como material y muestra cómo tratar las propiedades mecánicas de los suelos y su comportamiento bajo diversas cargas y condiciones de humedad [13].

Arthur Casagrande en 1932 escribió uno de los primeros tratados donde se discute la estructura de la arcilla y su impacto en la ingeniería de cimentaciones [2].

La primer utilización de cal para la estabilización de suelos en Estados Unidos fue en el año de 1943 realizada por el Corp of Engineers en Texas para bajar la plasticidad de un suelo empleándose el 2% de cal hidratada[12]. Desde la década de 1950 han descrito sus casos exitosos al modificar el comportamiento de la arcilla, Dubose usando compactación en 1955, Jones en 1958 inicia la discusión de la estabilización de arcillas con cal hidratada y cemento Portland [2].

En el pasado se utilizaron métodos de tratamiento del suelo más como remedios desesperados para hacer frente a problemas relacionados con el terreno inestable, hoy su uso son como parte del proceso de construcción normalmente empleado. Este cambio se debe a dos cosas: La primera es por la gran velocidad de los trabajos de construcción y la segunda se debe a la creciente escasez de sitios adecuados para proyectos industriales o de vivienda [14].

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 MÉTODOS FÍSICOS

Confinamiento para suelos friccionantes, consolidación previa para suelos arcillosos, mezclas de suelo con suelo y vibroflotación.

2.2.1.1 CONSOLIDACIÓN PREVIA

Los métodos más comunes para el mejoramiento de suelos arcillosos son la precarga convencional y la precarga con drenes verticales, dichos sistemas consisten en el mismo criterio, el cual es generar un exceso de presión de poro. Pero la eficiencia es diferente ya que los drenes permiten disipar la presión de poro con mayor velocidad [4].

Estos métodos consisten en la aplicación de una precarga es decir colocar un material directamente sobre la masa de suelo que ejerza una carga mayor a la carga de servicio, y generalmente se realiza también la colocación de un sistema de drenaje, el cual pueden ser drenes de material extraído de un banco (arena o grava) o materiales prefabricados (PVD's), esto para facilitar la disipación de las presiones intersticiales y aumentar la velocidad del proceso de consolidación, y como resultado del proceso de consolidación se genera la deformación del suelo y la magnitud de esta deformación depende directamente de la magnitud de la sobrecarga aplicada [4].

El método de precarga fue utilizado en el NAIM (Nuevo Aeropuerto Internacional de la ciudad de México), dicho método funcionó correctamente y tuvo una eficiencia la cual cumplió con el mejoramiento deseado.

2.2.1.2 MEZCLA DE SUELO CON SUELO

Este tipo de estabilización es de amplio uso. Los suelos de grano grueso, como grava-arena, tienen una fricción interna alta, lo que les permite soportar grandes esfuerzos; sin embargo, esta cualidad no hace que sean estables para ser usadas como material de base en una carretera, ya que al carecer de cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos pueden separarse [15].

Las arcillas, al contrario, tienen notoria cohesión y poca fricción, lo que provoca que pierdan estabilidad ante contenidos de agua altos. La mezcla adecuada de los dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se aprovecha la fricción interna de uno y la cohesión del otro. Sin embargo, la sola mezcla no logra producir los efectos deseados, si no que se requiere, de compactación [15].

2.2.1.3 VIBROFLOTACIÓN Y VIBROSUSTITUCIÓN

Diseñado en Alemania en 1936 la vibroflotación se basa en el hecho de que las partículas en estos suelos pueden ser redistribuidas por medio de vibraciones. En la mayoría de los casos, ayudados por la inyección de agua, se reduce temporalmente la fricción entre las partículas permitiendo que se depositen por gravedad en su posición más densa (más compacta). Después de cierta cantidad de tiempo de vibroflotación, las partículas quedan arregladas en su posición óptima. Se levanta el vibrador 50 cm. y otra vez se vuelve a compactar capa por capa sucesivamente hasta cubrir toda la profundidad necesaria, simultáneamente agregando material granular.

La técnica de vibrosustitución nace en Alemania en 1957 bajo la necesidad de mejorar cierto tipo de estratos, principalmente suelos como limos o limos-arcillosos, mezclas de gravas, arenas y arcillas con contenidos pasantes del tamiz 200 en exceso del 20% [16].

Por sus características cohesivas, las partículas no se separan cuando están sometidas a vibraciones; solo se deslizan entre sí y pueden ser desplazadas o sustituidas por la máquina [16].

Después de penetrar y llegar a la profundidad requerida se retira el “*vibroflot*” y se rellena el pozo con material granular grueso a medida que se compacta capa por capa formando así una columna de piedra y a la vez empujando lateralmente la piedra dentro del suelo colindante. La columna de piedra y el suelo in-situ forman un sistema integrado de baja compresibilidad y alta resistencia al corte. El exceso de presión de poros se disipa fácilmente por las columnas de piedra que actúan al mismo tiempo como drenes verticales. Por estos motivos los asentamientos ocurren más rápido que normalmente en suelos cohesivos [16].

2.2.2 MÉTODOS MECÁNICOS (COMPACTACIÓN)

La compactación es un proceso mecánico destinado a mejorar las características de comportamiento de los materiales térreos que constituyen la sección estructural de las carreteras, los ferrocarriles o las aeropistas.

En el caso de las vías terrestres existen las características que se pretenden mejorar a través de la compactación son la deformabilidad, que implica la intención de disminuir la compresibilidad de los suelos e incrementar su estabilidad volumétrica, especialmente ante la absorción o pérdida de agua; la resistencia, especialmente al esfuerzo cortante, obviamente en el sentido de obtener los mayores valores posibles y unas adecuadas relaciones esfuerzo-deformación que garanticen un balance conveniente en el comportamiento.

Todo proceso de compactación implica una doble acción sobre una estructura de los suelos. En primer lugar será preciso romper y modificar la estructura original que el suelo tenía en el lugar de donde fue recogido; en segundo lugar, habrá que actuar sobre él, modificando la disposición o acomodo de sus grumos o partículas, para hacer que el conjunto adopte la nueva estructura, más densa. [PONER CITAS]

2.2.3 MÉTODOS QUÍMICOS

La estabilización química consiste en alterar las propiedades del suelo usando un cierto aditivo, el cual mezclado con el suelo, normalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo y en algunos casos, pega los granos entre sí de modo de producir un incremento en su resistencia [17].

Los aditivos comúnmente utilizados para la estabilización de suelos son: cal, cemento y asfalto, la estabilización de suelos produce las siguientes ventajas:

- Mejora materiales marginales
- Mejora la resistencia
- Mejora la durabilidad
- Controla el cambio de volumen del suelo

- Mejora la trabajabilidad del suelo
- Reduce los requerimientos de espesor de los pavimentos
- Provee un suelo impermeable
- Reduce el polvo

2.2.4 CONTROL DE CALIDAD

El control de la calidad hoy en día es un aspecto tan importante como la fabricación o construcción del producto mismo. La existencia de diferentes tipos de industrias y en consecuencia de productos hace que también existan diferentes formas de controlar la calidad en la producción de cada uno.

De esta manera surge la importancia de clasificar a la construcción por el tipo de industria que es así de esta manera, entenderemos y orientaremos nuestro estudio al tipo de control de la calidad.

El tipo de control de la calidad, se establecerá después de definir y estudiar el producto mediante una breve descripción del mismo.

Para el planteamiento del control de la calidad de dicho producto, deberán estudiarse todos y cada uno de los factores que provocan la variabilidad en la producción del mismo, como lo son:

Maquinaria y equipo

Materiales

Método de construcción

Factores climatológicos

Personal

Tanto el control como el aseguramiento de la calidad se basan en la información referente a las especificaciones y normas siguientes, que son utilizadas en nuestro país:

Normativa del IMT (Instituto Mexicano del Transporte)

ASTM (American Society for Testing and Materials).

AASHTO (American Association of State Highway and Transport Official).

FP (Standard Specifications for construction of Roads and Bridges on Federal Highway Projects).

Se han encontrado suelos expansivos en diferentes partes del mundo, incluyendo México. Algunos de los estados del país donde se ha identificado el problema son:

Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Tamaulipas, Morelos, Baja California, Veracruz, Chiapas, Campeche, Sonora y Sinaloa. Zepeda y Castañeda indicaron que el 25% de la superficie del país está cubierto con vertisoles como suelo principal; considerando que la mitad de ese porcentaje corresponde a condiciones ambientales que inducen el fenómeno de expansión de suelo se puede afirmar que aproximadamente un 12% del territorio nacional está constituido por depósitos arcillosos potencialmente expansivos [18].

No obstante, de acuerdo a la distribución de suelos expansivos potenciales mencionados, puede esperarse que en muchas otras ciudades y lugares cercanos a ellas también se presenten problemas; algunas de estas ciudades son: Torreón, Colima, Oaxaca, San Juan del Río, Guamuchil, Tampico y Poza Rica[18].

En la figura 1 se muestra como se encuentran los suelos expansivos en varias ciudades del país.



Figura 1 Ubicación de Suelos Expansivos en varias ciudades del país

Nuestro país alberga muchos volcanes, oficialmente se han contabilizado hasta dos mil en su mayoría inactivos por lo que no representan algún peligro. Pero existen 12 activos distribuidos casi todos en el centro-sur de México [19].

La Secretaría de Gobernación estima que el 75 por ciento de la población en México vive cerca de un volcán, siendo el de Colima y el Popocatepetl los que se monitorean 24 horas todo el año y su actividad se puede ver en tiempo real en el Atlas Nacional de Riesgos [19].

2.3 ESTADO DEL ARTE

Eades y Grim desarrollaron su prueba rápida para determinar el contenido de cal requerido, que se basa en el concepto de que cuando se agrega un compuesto cáustico a base de calcio al suelo arcilloso, se produce una reacción que se basa en la solubilidad suelo-sílice y suelo-alúmina en un pH alto. Así, el pH evolucionó como una prueba rápida para identificar el contenido óptimo de cal. Así mismo, identificó los productos de reacción cal-suelo y también presentó datos convincentes que muestran cómo la estabilización de los suelos de diferentes mineralogías puede requerir cantidades muy diferentes de cal. En su estudio, compararon una caolinita de Georgia que requería un 4% de cal hidratada para la estabilización con una montmorilonita de Wyoming que no era reactiva hasta que se agregó un 10% de cal hidratada [2].

Se han realizado diversos estudios en la actualidad donde se utiliza el método de Eades encontrado en la norma ASTM-D-6276 [20], donde se añadieron diferentes proporciones de cal a diferentes tipos de suelos arcillosos, fueron curados durante 28 días y estos mejoraron sus capacidades de carga en la prueba de presión no confinada de entre 130 y 250 kPa, otro estudio demuestra que la resistencia a la compresión no confinada de puede aumentar hasta ocho veces más (de 125 a 1000 kPa) con el contenido óptimo de cal. El límite líquido presenta un decremento entre el 5% y el 8% así mismo el índice plástico disminuye del orden de 1.5% hasta el 12% [1, 21-23].

Prusinski afirma que desde 1915 se han construido más de 140,000 km de bases de pavimento de 7.5 m de ancho a partir de suelos estabilizados con cemento. El cemento se ha encontrado efectivo para estabilizar una amplia variedad de suelos, incluyendo materiales granulares, limos y arcillas [2].

Para suelos modificados con cemento, el ingeniero selecciona un objetivo y define los requisitos de cemento en consecuencia. Los objetivos pueden incluir uno o más de los siguientes: reducir el índice de plasticidad; aumentando el límite de contracción; reduciendo el cambio de volumen del suelo; reduciendo partículas de arcilla / limo; cumplir con los valores / índices de resistencia, CBR, la prueba triaxial; y mejora el módulo elástico [2].

Estudios realizados a muestras agregando la cantidad óptima de cemento que van desde el 3% hasta el 6.5% según el Departamento de Transporte de Texas (TxDOT) el cual menciona que: El contenido óptimo de cemento se define como un porcentaje de cemento en una muestra de suelo que produce un valor de UCS de 1035 kPa (150 psi). Para un suelo de subsuelo tratado en un período de curado de 7 días muestran una reducción de entre el 11% 20% del índice plástico, y un aumento que va desde los 400 kPa hasta los 1800 kPa en la prueba de presión no confinada y una disminución típica del orden del 1% del pH [22].

La ceniza volcánica se ha estudiado de la misma manera, referente a su uso como estabilizador de suelos logrando, buenos resultados al utilizarse por sí sola, pero mejorándolos al utilizarse junto con cal o polvo de horno de cemento.

En la tabla 1 se muestran los artículos relacionados a la estabilización de suelos con ceniza volcánica y cal, tomando en cuenta los parámetros de las arcillas estudiadas como son su clasificación en el SUCS, límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad), valor de soporte de California (CBR) y expansión, así mismo en su caso se especifica si la ceniza volcánica fue tamizada y sus propiedades químicas, tomando en cuenta el óxido de calcio presente en la ceniza y sus componentes activos, los cuales son los silicatos y aluminatos [24].

En la tabla 2 se muestran las diferentes mezclas que se realizaron y los mejores resultados obtenidos de los parámetros antes mencionados en la tabla 1, así como la mezcla con la que se obtuvo dicho resultado. Así mismo se obtuvieron conclusiones en base a los resultados.

Tabla 1 Artículos revisados y parámetros de los mismos

Nombre del artículo	Año	Arcilla según SUCS	LL (Límite líquido)	PL (Límite plástico)	PI (Índice de plasticidad)	CBR	Expansión	Tamizado de VA (Ceniza volcánica)	Componentes de VA (Ceniza Volcánica)	
The influence of using quicklime and volcanic ash as stabilizing materials in clay viewed from CBR value	2017 [25]	CL	47.33	17.35	29.88	6.29	NO	No específica	No específica	
Effect of Volcanic Ash Utilization as Substitution Material for Soil Stabilization in View Point of Geo-Environment	2014 [26]	CH	80	29	51	1.07	22.77	270 Y 60	SiO ₂	60.49
									Al ₂ O ₃	21.97
									CaO	3.95
Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite	2014 [27]	CH	87.2	28.9	58.3	NO	8	200	SiO ₂	70.96
									Al ₂ O ₃	13.4
									CaO	0.76
Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil	2016 [28]	CH	58.8	30	28.8	2.89	7.41	No específica	SiO ₂	46.5
									Al ₂ O ₃	19.28
									CaO	8.5
Clay Stabilization Using the Ash of Mount Sinabung in Terms of the Value of California Bearing Ratio (CBR)	2018 [29]	CL	48.64	18.81	29.82	4.8	NO	No específica	No específica	
Effect of Kelud Volcanic Ash Utilization on The Physical Properties as Stabilizer Material for Soil Stabilization	2016 [30]	CH	69.43	34.26	35.17	NO	NO	No específica	No específica	
Study of stabilized soil clay soil	2020	CH	80	37	43	NO	NO	No específica	No específica	

characteristics using volcanic ash and tailing as subgrade layers	[31]									
Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes	2011 [32]	CL	39	20	19	11	NO	No especifica	SiO ₂	46.5
									Al ₂ O ₃	19.28
									CaO	8.5
Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans	2018 [24]	CL	57.4	31	26.4	1.6	15.8	200	SiO ₂	43.26
									Al ₂ O ₃	13.35
									CaO	10.69

Tabla 2 Resultados obtenidos de los diferentes artículos revisados

Nombre del artículo	Año	Cal	Proporciones (Cal -VA) en %	LL (Límite líquido)	PL (Límite plástico)	PI (Índice de plasticidad)	CBR	EXPANSION	CONCLUSIONES
The influence of using quicklime and volcanic ash as stabilizing materials in clay viewed from CBR value	2017 [25]	Si	CAL (2 y 4) VA (2,6,8...24)	31.55 4L24VA	20.22 4L24VA	11.33 4L24VA	9.01 4L8VA	NO	- A MAYOR VA MENOR EL LL Y PI - NO NECESARIAMENTE A MAYOR VA MAYOR CBR
Effect of Volcanic Ash Utilization as Substitution Material for Soil Stabilization in View Point of Geo-Environment	2014 [26]	Si	CAL (5 Y 10) VA(15,20,..35)	61 10L35V MALLA 60	NO	NO	75 10L35VA MALLA 270	3.5 5LVA30	- A MAYOR VA MENOR EL LL - MAS FINA LA CENIZA MAYOR EL CAMBIO DE PROPIEDADES - A MAYOR CAL MAYOR CBR
Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite	2014 [27]	SI	CAL 8 P(10,20,30..50)	39.2 8L50P	NO	0 8L50P	NO	0.95 8LP30	- A MAYOR VA MENOR EL LL - NO NECESARIAMENTE A MAYOR VA MAYOR UCS - SE UTILIZO LA CAL ÓPTIMA OBTENIDA CON EL METODO DE EADES Y GRIM
Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil	2016 [28]	SI	CAL (2 y 4) VA (10,20)	43.2 4L20VA	43.5 8L10VA	2.87 8L20VA	90.96 8L20VA	NO	- A MAYOR VA MENOR EL LL
Clay Stabilization Using the Ash	2018	NO	VA	30.15	21.11	9.04	8.95	NO	- A MAYOR VA MENOR

of Mount Sinabung in Terms of the Value of California Bearing Ratio (CBR)	[29]		(2,3,4,5...20)	VA20	20VA	20 VA	20VA		EL LL Y PI - A MAYOR VA MAYOR CBR
Effect of Kelud Volcanic Ash Utilization on The Physical Properties as Stabilizer Material for Soil Stabilization	2016 [30]	SI	CAL (3,5,7,8) VA(20,22,30)	46.16 8L25VA	67.48 8L20VA	1 5L27VA	NO	NO	- NO A MAYOR VA MENOR LL Y PI
Study of stabilized soil clay soil characteristics using vulcanic ash and tailing as subgrade layers	2020 [31]	NO (DESECHOS DE MINA)	VA 8 T(4,5,6)	37 VA8T6	29 8VA5T	20 8VA5T	NO	NO	
Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes	2011 [32]	NO (POLVO DE HORNO DE CEMENTO)	VA (5,12) C(2,5)	NO			174 5 VA 5C	NO	
Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans	2018 [24]	SI	CAL (1,3) VA (15,20)	47 3L20VA	24.8 3L20VA	22.2 3L20VA	29.1 3L20VA	2 3L20VA	- A MAYOR VA MENOR EL LL Y PI - A MAYOR VA MAYOR CBR

2.4 MARCO TEÓRICO

2.4.1 ARCILLA

Arcilla es una asociación de minerales arcillosos (silicatos complejos hidratados de aluminio) de pequeño tamaño de partícula originada por la alteración de rocas ígneas (granitos, riolitas, dioritas, basaltos), que bajo condiciones de presión, temperatura, acidez, desilicifican a minerales arcillosos sílice libre y alcalies [33].

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados y en algunas ocasiones presentan silicatos de magnesio, hierro u otros minerales también hidratados. Tienen casi siempre una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas existiendo dos variedades: la sílica y la alumnínica [13].

Dentro del SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) se cubren a los suelos finos y gruesos distinguiéndolos por el cribado a través de la malla 200, las partículas gruesas son mayores a esta malla y las finas menores. Un suelo es considerado grueso si más del 50% de las partículas son gruesas y fino, si mas de la mitad de sus partículas, en peso son finas [13].

A su vez los suelos finos se subdividen en 3 grupos:

- Limos inorgánicos (M)
- Arcillas inorgánicas (C)
- Limos y arcillas orgánicas (O)

A su vez estos tipos se subdividen en dos grupos según su límite líquido, si este es menor al 50% son de compresibilidad baja o media y se añade el símbolo L (Baja compresibilidad) y si su límite líquido es mayor al 50% son de compresibilidad alta y se añade el símbolo H (Alta compresibilidad).

El grupo de las arcillas CL comprende la zona sobre la Línea A, definida por un límite líquido menor de 50% y un índice plástico mayor al 7%. El grupo CH corresponde a la zona de arriba de la Línea A, definida por el límite líquido mayor a 50% Tal como se muestra la Carta de Plasticidad en la figura 1.1.

La línea A empíricamente obtenida sirve de frontera entre los grupos de suelos finos, los suelos cuyas partículas finas exhiben mayores características de plasticidad son aquellos situados en las líneas inclinadas en la partes superior de la gráfica, los suelos con alto contenido de materia orgánica, así como aquellos que contienen finos de baja plasticidad se sitúan en las zonas bajas [13].

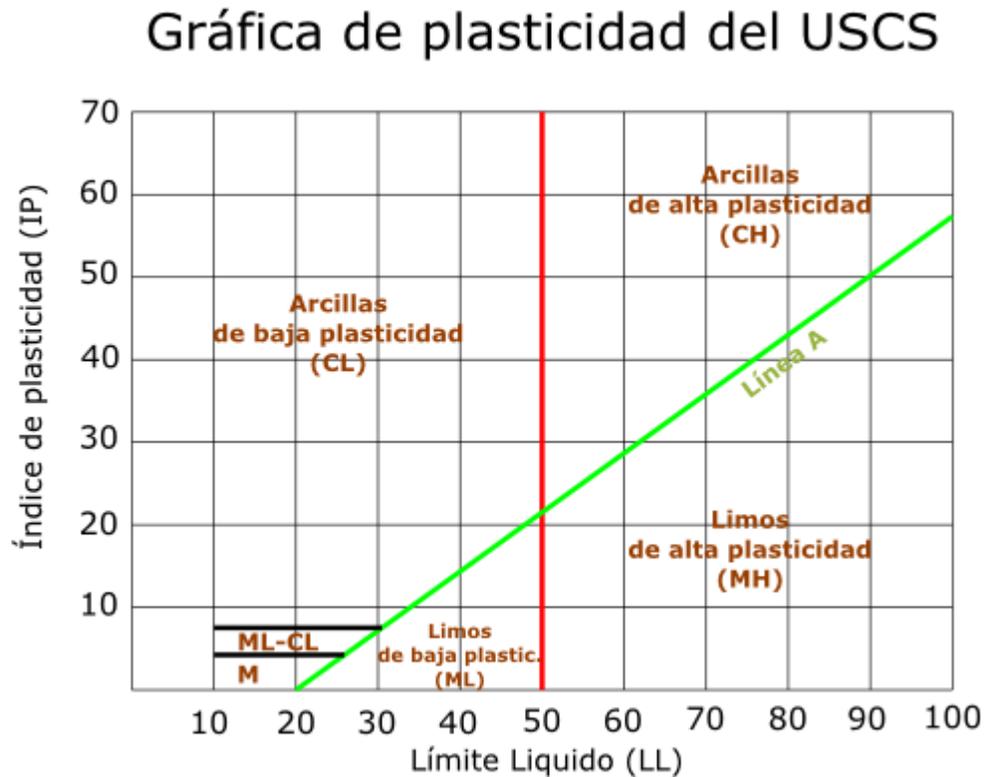


Figura 2 Carta de Plasticidad [13]

En general las arcillas son plásticas, se contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su humedad, son compresibles y al aplicárseles una carga en su superficie se comprimen lentamente, la resistencia que pierde este tipo de suelo por el remoldeo se recupera con el tiempo [11].

2.4.2 CAL

La cal se puede producir a partir de una serie de materiales carbonados. Generalmente se produce mediante la quema de piedra caliza, que es fundamentalmente carbonato de calcio

(CaCO_3). Cuando se calienta a $900\text{ }^\circ\text{C}$, el carbonato de calcio comienza a disociarse para producir óxido de calcio (cal viva) y dióxido de carbono. La forma de la piedra caliza se mantiene, pero su peso se reduce en 45%. La cal se hidrata (se apaga) con agua para formar hidróxido de calcio. En este proceso de conversión de cal viva en cal muerta, el material se calienta, se expande, y se convierte en un polvo fino [34].

El hidróxido de calcio es un cuerpo sólido, blanco, amorfo, pulverulento, soluble parcialmente en el agua. La cal apagada en pasta tiene la propiedad de endurecer lentamente en el aire enlazando los cuerpos sólidos, por lo cual se la emplea como aglomerante. Este endurecimiento recibe el nombre de fraguado y se debe, en principio, a una desecación por evaporación del agua con la que forma la pasta, y luego de una carbonatación por absorción del anhídrido carbónico del aire [21].

2.4.3 CEMENTO

El cemento Portland se obtiene de la pulverización del Clinker, el cual se produce por la calcinación hasta la fusión insipiente de materiales calcáreos y arcillosos y está constituido por los siguientes componentes:

Silicato tricálcico, del cual depende su resistencia inicial e influye directamente en el calor de hidratación.

Silicato dicálcico, el cual define la resistencia a largo plazo y no tiene tanta incidencia en el calor de hidratación.

Aluminato tricálcico, es un catalizador en la reacción de los silicatos y ocasiona un fraguado violento.

Alumino-Ferrito tetracálcico, influye en la velocidad de hidratación y secundariamente en el calor de hidratación.

Componentes menores: Óxidos de magnesio, potasio, sodio, manganeso y titanio [35].

Tiene propiedades tanto cohesivas como adhesivas, que le dan la capacidad de aglutinar los agregados o áridos para conformar el concreto [36].

Según la norma ASTM-C-150-07 [37] existen diversos tipos de cemento los cuales son:

Tipo I—Para usar cuando no se requieran las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.

Tipo IA—Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo I, donde se desea incorporación de aire.

Tipo II— Para uso general, más específicamente cuando se desea resistencia moderada a los sulfatos o calor de hidratación moderado.

Tipo IIA—Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II, donde se desea incorporación de aire.

Tipo III—Para usar cuando se desea alta resistencia temprana.

Tipo IIIA—Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo III, donde se desea incorporación de aire.

Tipo IV—Para usar cuando se desea bajo calor de hidratación.

Tipo V—Para usar cuando se desea alta resistencia a los sulfatos [37].

Una puzolana se define generalmente en ASTM-C-125 [38] como un material silíceo o silíceo y aluminoso que, en sí mismo, posee poco o ningún valor cementoso, pero que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reaccionará químicamente con hidróxido de calcio (cal) a temperatura normal para formar compuestos que poseen propiedades cementosas. [39]

2.4.4 PUZOLANAS

La norma ASTM-C-618 [40] clasifica las puzolanas naturales y cenizas volantes de carbón 3 las cuales son:

Clase N: puzolanas naturales crudas o calcinadas que cumplen con los requisitos aplicables para la clase tal como se indica aquí, como algunas tierras de diatomeas; opalinas y lutitas; tobas y cenizas volcánicas o pumicitas, calcinadas o no calcinadas; y varios materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y lutitas.

Clase F: cenizas volantes que cumplen con los requisitos aplicables para esta clase, como se indica en este documento. Esta clase de cenizas volantes tiene propiedades puzolánicas.

Clase C: cenizas volantes que cumplen con los requisitos aplicables para esta clase como se indica en este documento. Esta clase de cenizas volantes, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementosas [40].

2.4.4.1 CENIZA VOLCÁNICA

La ceniza volcánica producida por la actividad volcánica consiste en rocas, minerales y fragmentos de vidrio volcánico, tienen una reacción puzolánica debido a la presencia de vidrio volcánico formado por el rápido enfriamiento de la ceniza producida por la erupción volcánica [41].

La composición química varía dependiendo de la fuente del material, pero el compuesto reactivo predominante son los aluminosilicatos. La reactividad química se ve reforzada por la gran superficie del vidrio que tiene una superficie microporosa [41].

2.4.5 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de suelos es una serie de procesos mecánicos, físicos, físico-químicos y químicos que transforman las propiedades de los suelos que interesan en las aplicaciones de la ingeniería, obteniendo un material apto para su utilización, que busca mejorar las propiedades tales como: resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, estabilidad volumétrica, compresibilidad, trabajabilidad y permanencia de las propiedades adquiridas [21].

La estabilización del suelo con adiciones químicas es benéfica en muchos aspectos tales como: mejorar las propiedades de resistencia (incluida la resistencia al corte y la resistencia a la compresión), mitigar y reducir la inestabilidad del volumen y el potencial de hinchamiento y controlar la contracción, reducir el índice de plasticidad (IP), reducir la permeabilidad, reduciendo la compresibilidad del suelo, la deformación y el asentamiento, reduciendo las partículas del tamaño de arcilla / limo, mejorando el módulo elástico, y mejorando la durabilidad para resistir condiciones ambientales desfavorables como la congelación-descongelación o la humedad ciclos de secado, erosión y erosión [42].

La estabilización del suelo por la cal se refiere a la mezcla de este material en forma de hidróxido de calcio al suelo y la compactación de la mezcla en el contenido óptimo de agua. Estos procesos químicos modifican la estructura del suelo por lo que se forman agregados de grano más grandes [1].

Los estabilizadores a base de calcio como el cemento Portland o los que tienen propiedades puzolánicas implican cinco procesos para mejorar las propiedades de los suelos arcillosos:

hidratación, intercambio catiónico, floculación y aglomeración, reacción puzolánica, y carbonatación potencial [42].

2.4.5.1 MECANISMOS DE REACCIÓN EN ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS

El proceso de intercambio de cationes debido a la mezcla de estabilizadores con el suelo provoca la floculación y la aglomeración de las partículas del suelo, lo que a su vez produce un suelo con una distribución de tamaño de partícula más gruesa, mayor permeabilidad y menor plasticidad. Este proceso comienza inmediatamente después de mezclar el agente estabilizante con tierra y dura solo unas pocas horas [42].

Cuando se agrega cal hidratada al suelo, se disocia en iones Ca^{2+} y OH^- . La liberación de iones OH^- aumenta el pH a 12.4, lo que hace que la sílice y la alúmina de los minerales arcillosos se disuelvan, y en combinación con los iones Ca^{2+} forman hidratos de silicato de calcio (C-S-H) e hidratos de aluminato de calcio (C-A-H) [43].

En las cenizas volcánicas el pequeño contenido de óxido de calcio conduce a la insuficiencia de la reacción puzolánica entre los suelos arcillosos y tales cenizas. Por lo que se le adiciona cal para que el hidróxido de calcio reaccione con el elemento activo de la ceniza volcánica. Los nuevos minerales, como el silicato de calcio hidratado y el aluminato de calcio hidratado, se producen para mejorar la estabilidad del agua y la resistencia de los suelos expansivos [24].

El límite líquido en las mezclas de arcilla con ceniza volcánica y cal baja debido a que el suelo se sometió al proceso de cementación por cal viva y cenizas volcánicas, de modo que se convirtió en partículas más grandes que disminuyeron su fuerza de arrastre [25].

La disminución en el valor del índice de plasticidad podría disminuir la potencia para el desarrollo y el agotamiento del suelo. Esto se debió al proceso de hidratación de la cal viva que se agregó al suelo. Este proceso fortaleció la unión entre las partículas del suelo para que se establecieran partículas más duras y estables. El relleno de los poros del suelo minimiza la incidencia de infiltración en la mezcla de cal viva del suelo que tuvo el impacto en la disminución y el aumento del suelo. La adición de material estabilizante como la ceniza volcánica los componentes activos como el sílice y alúmina mezclada con agua establecerá una pasta que une las partículas de arcilla y cubre los poros del suelo. Los agujeros de los poros están rodeados de materiales de cementación que son difíciles de

infiltrar por el agua, de modo que la mezcla de cenizas volcánicas con el suelo no será sensible a la absorción de agua, por lo que su plasticidad y expansión disminuyen [29].

2.4.6 LÍMITES DE ATTERBERG

En la actualidad, los límites de Atterberg son las determinaciones que con más asiduidad se practican en los laboratorios de Mecánica del Suelo. Su utilidad deriva de que, gracias a la experiencia acumulada en miles de determinaciones, es suficiente conocer sus valores para poderse dar una idea bastante clara del tipo de suelo y sus propiedades. Como, por otra parte, se trata de determinaciones sencillas y rápidas, permiten una pronta identificación de los suelos y la selección adecuada de muestras típicas para ser sometidas a ensayos más complicados [44].

En México la obtención de estos límites se encuentra normalizada en el manual M-MMP-1-07/07 Límites de Consistencia [45].

2.4.6.1 LÍMITE LÍQUIDO

El límite líquido como fue definido por Atterberg ha estado sujeto a distintas variaciones en su determinación. Fue Terzaghi, quien le sugirió a Casagrande en 1927, que diseñara un dispositivo mecánico que pudiera eliminar en la medida de lo posible los errores del operador en la determinación del mismo. Casagrande desarrolló un dispositivo normalizado como se muestra en la norma M-MMP-1-07/07 Límites de Consistencia [45].

El límite líquido, se estableció como la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en una cuchara normalizada, cuando un surco, realizado mediante un acanalador normalizado, que divide dicho suelo en dos mitades, se cierra a lo largo del fondo en una distancia de 13 mm, tras haber dejado caer 25 veces la mencionada cuchara desde una altura de 10 mm sobre una base también normalizada, con una cadencia de 2 golpes por segundo. La altura de caída, como las dimensiones del cascador y las dimensiones de la ranura, como el material de la base, etc., son factores de influencia en los resultados obtenidos [44].

Para entender el significado del ensayo mediante el dispositivo desarrollado por Casagrande, se puede decir que para golpes secos, la resistencia al corte dinámica de los taludes de la ranura se agota, generándose una estructura de flujo que produce el deslizamiento. La fuerza resistente a la deformación puede considerarse como la resistencia al corte de un suelo. La resistencia al corte de todos los suelos en el límite líquido es constante y tiene un valor aproximado de 2,2 kPa [44].

2.4.6.2 LÍMITE PLÁSTICO

El límite plástico es la frontera para pasar del estado plástico al estado semisólido. Existen suelos en los cuales no puede determinarse el límite plástico, por lo tanto se los denomina suelos no plásticos (NP) [46].

El procedimiento realizado es la determinación del contenido de humedad del suelo al cual un cilindro se rompe o se agrieta, cuando se enrolla a un diámetro aproximado de tres milímetros, al rodarse con la palma de la mano sobre una superficie lisa [46].

2.4.6.3 ÍNDICE PLÁSTICO

Es la diferencia numérica entre el Límite Líquido y el Límite plástico, nos indica la margen de variación del contenido de humedad en el cual el suelo está en estado plástico semisólido [46].

Los suelos que tienen índice de plasticidad alto son altamente compresibles. Es evidente que el índice de plasticidad es una medida de la cohesión; índices de plasticidad altos denotan un alto grado de cohesión; suelos que no tienen índice de plasticidad tales como las arenas de baja cohesión, son suelos no plásticos [46].

2.5 MARCO LEGAL

Enfocándose en que es de suma importancia hacer uso consciente de los recursos con los que contamos, en este caso arcilla y ceniza volcánica, debemos de tener el concepto de sustentabilidad muy bien definido y esto se ve reflejado en las leyes y acuerdos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) por lo cual es de suma

importancia atender a los lineamientos y observaciones que la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) [47], nos hace sobre contaminación de suelo, regulaciones ambientales, y preservación del equilibrio ecológico.

Para conocer el contenido óptimo de cal se revisó la norma ASTM-D-6276 [20]. Esta prueba identifica la cantidad de cal requerida para satisfacer inmediatamente las reacciones suelo-cal, y proporciona suficiente calcio residual y un sistema con pH alto (cerca de 12.4 a 25°C). Esto es necesario para tener condiciones apropiadas para que se presenten las reacciones puzolánicas a largo plazo, que son las responsables del desarrollo de la rigidez y la resistencia [48].

Así mismo para la obtención de materiales y realización de pruebas se aplicaron los métodos de los manuales del Instituto Mexicano del Transporte para regular su procedimiento como son:

M-MMP-1-01/03 Muestreo de materiales para Terracerías [49]

M-MMP-1-03/03 Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras [50]

M-MMP-1-04/03 Contenido de Agua [51]

M-MMP-1-07/07 Límites de Consistencia [45]

El manual M-MMP-1-07/07 se utilizó para obtener el límite líquido es decir, el contenido de agua para el cual un suelo plástico, adquiere una resistencia al corte de 2.45 kPa (25 g/cm²). [45]. El límite líquido también se puede definir como el porcentaje de contenido de humedad con que un suelo cambia, al disminuir su humedad, de la consistencia líquida a la plástica, o, al aumentar su humedad, de la consistencia plástica a la líquida. Los límites líquido y plástico dependen de la cantidad y el tipo de arcilla presentes en el suelo.

La normativa que deberá cumplir el material que se desea obtener será la N-CMT-1-01/16 [3].

3 PROYECTO DE INTERVENCIÓN

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la proporción óptima de ceniza volcánica y cal que al adicionarse a la arcilla mejorarán sus características y propiedades, a fin de que cumpla con los criterios de aceptación de la norma N-CMT-1-01/16 [3] para capas de terraplén.

3.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las características que marca la norma N-CMT-1-01/16 [3] para la ceniza volcánica.
- Describir las características que marca la norma N-CMT-1-01/16 [3] para la arcilla.
- Proponer una mezcla que cumpla con la norma N-CMT-1-01/16 [3]
- Realizar análisis de precios para comprobar la factibilidad económica de la mezcla.
- Elaborar conclusiones y recomendaciones.

3.2 JUSTIFICACIÓN

Con este trabajo se pretende resolver la problemática que representa la arcilla en la construcción de carreteras adicionando un producto desecho de la naturaleza como es la ceniza volcánica, así se aprovecharía dicho desecho y se reduciría el uso de los estabilizadores más comunes como lo son la cal y el cemento, la producción de cada uno genera grandes emisiones de CO₂ al ambiente, también desde el punto de vista económico y ambiental se reducirían costos e impacto ambiental ya que no se tendría que extraer el material arcilloso y utilizar material de banco.

Los principales beneficiarios de este proyecto serían los constructores ya que desde el punto de vista económico sus proyectos serían menos costosos, así mismo la sociedad en dos aspectos, si se está en obra pública al tener este nuevo producto se reduciría el gasto público y con la disminución del uso de los estabilizadores comunes se disminuirá las emisiones del CO₂.

Así mismo se beneficiaría la población al extraer material que puede ser nocivo para la salud humana mismo que es un desecho de la naturaleza sin aprovechar.

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 MATERIALES

Ceniza Volcánica obtenida del Volcán de fuego, ubicado en el estado de Colima.

Cal obtenida comercialmente.

Arcilla de un predio próximo a urbanizarse.

3.3.2 INFRAESTRUCTURA

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Culiacán.

3.3.3 DESARROLLO DEL PROYECTO

3.3.3.1 OBTENER MUESTRAS DE ARCILLA

Se obtuvieron muestras del material cohesivo (arcilla) de un predio próximo a urbanizarse por una inmobiliaria en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, junto al Fraccionamiento Urbi del Cedro, en la zona noroeste de la ciudad como se muestra en la figura 3.

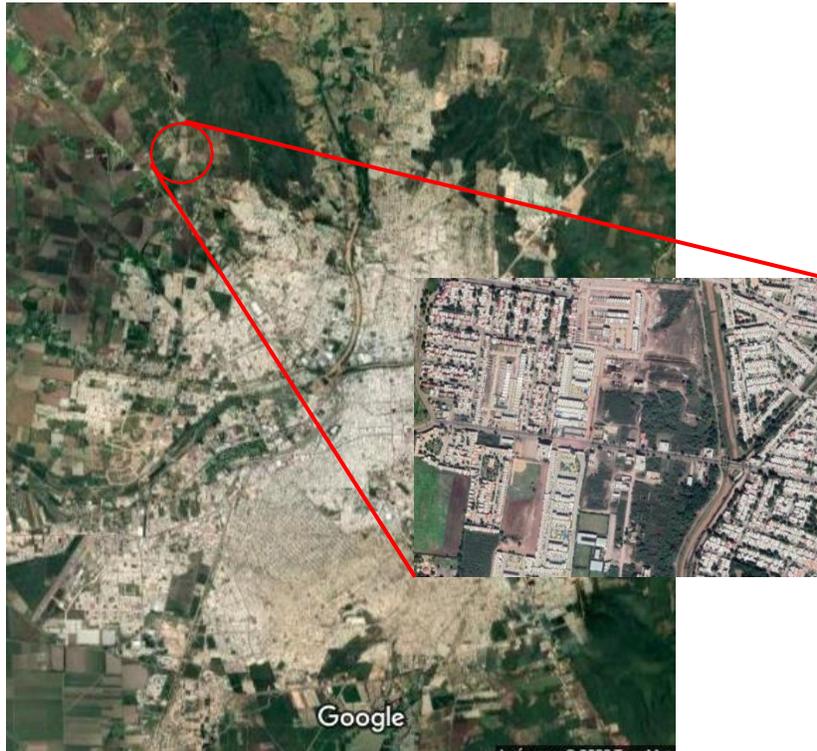


Figura 3 Ubicación del predio donde se obtuvo la arcilla

3.3.3.2 OBTENCIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA Y CAL

Se obtuvo ceniza volcánica proveniente del río La Lumbre, el cual tiene sus orígenes en las inmediaciones del Volcán de Fuego, ubicado en Colima, México., el material fue transportado por medio de cubetas. Dicha ceniza se cribó por la malla No. 4 para retener gravas que contaminaron el material al momento de su extracción. Posteriormente la ceniza fue colocada en un molino de bolas para su molienda, el producto de esta molienda se tamizó por la malla No. 200. Tal como se muestra en la figura 3. Las muestras se almacenaron en el laboratorio, el cual está techado, cerrado limpio y seco, acomodando el material de manera ordenada.

Se obtuvo cal de una ferretería local la cual se transportó en bolsas de plástico almacenando el material en el laboratorio.

3.3.3.3 OBTENER EL CONTENIDO ÓPTIMO DE CAL POR EL MÉTODO DE EADES & GRIM

- Se realizó el método de Eades & Grim para conocer el contenido óptimo de cal para adicionarse a la arcilla normado por la ASTM-D-6276 [20]. El cual se realizó de la siguiente manera:
- Se tamizó la muestra con una malla No. 40 (425 micras) procurando desbaratar todos los grumos manualmente para hacer pasar todo el material a través de la malla.
- Se pesó una serie de 5 muestras de 20 g c/u y se colocó en frascos individuales con tapa roscada.



Figura 4 Ceniza volcánica del volcán de fuego de Colima

- Se pesó por separado una serie de muestras de cal equivalentes al 3, 4, 5, 6 y 7% del peso de la muestra de suelo.
- Se mezclaron perfectamente las muestras de suelo y cal en los frascos.
- 100 ml de agua fueron agregados a cada uno de los frascos, se cerró perfectamente cada frasco y se agitó vigorosamente cada 15-20 minutos, durante 1 hr.
- Posteriormente se midió el pH de la solución obtenida, con ayuda de tiras reactivas de pH (con escala 1-14).

Interpretación:

- La mezcla que arroje como resultado un pH de 12.4, indicará el porcentaje de cal que habrá de ser adicionado al suelo para lograr una estabilización completa.
- Si 2 mezclas arrojan resultados iguales de 12.4, se considerará como referencia el porcentaje de adición menor.

- Si ninguna muestra reporta un porcentaje mayor o igual a 12.4, se deberán preparar otras muestras, utilizando porcentajes más elevados de cal (8, 9, 10%...) hasta conseguir el pH requerido



Figura 5 Medición de pH en el método de Eades y Grim.

3.3.3.4 SECADO, DISGREGADO Y CUARTEO DE LA MUESTRA DE ARCILLA

Se realizó conforme al manual M-MMP-1-03/03 [50] el secado, disgregado y cuarteo de muestras de la siguiente manera:

El secado se realizó al aire libre ya que secar el material cohesivo al horno o en estufa, afecta la plasticidad del mismo. El secado se realizó extendiendo la muestra en las charolas, lisa y limpia, para que sea fácil recogerla, evitando la pérdida de finos y su contaminación; se revolvió periódicamente el material con un cucharón para lograr un secado más rápido y uniforme, hasta reducir su contenido de agua a un grado tal que permita su fácil disgregación.

Disgregado: para separar las diferentes partículas aglomeradas que constituyen la muestra, hasta quedar reducidas a sus fracciones más pequeñas, sin romper las partículas duras. El procedimiento se describe a continuación:

- Ya secada la muestra, se determinó y registró su masa con aproximación de 10 g.
- El material se cribó por la malla No 4 apartando la fracción que pasa esta malla.
- El material retenido en la malla No 4 se cribó en la malla de 3" y la fracción retenida se coloca en charolas de lámina, donde se disgregó con un mazo aplicando golpes verticalmente desde una altura aproximada de 20 cm hasta obtener partículas que ya no se disgregaron. El material disgregado se cribó nuevamente por la malla de 3".

- El material disgregado y cribado que pasó la malla de 3” se agregó al que inicialmente la pasó y se cribó por la malla de 2”, repitiendo el mismo procedimiento de cribado, disgregado. Se repitió la misma operación con las mallas de 1”, 3/8” y la No 4.
- Se reintegró la muestra con todas las porciones obtenidas en estas operaciones para posteriormente proceder al mezclado y cuarteo de la misma.

Cuarteo: para obtener de la muestra, proporciones representativas para efectuar las pruebas de laboratorio realizadas. El procedimiento es el siguiente:

- El material se colocó en una superficie plana y limpia.
- Con un cucharón pequeño se forma un cono con el material, tomándolo de la periferia y vertiéndolo sobre la cúspide; se aplano el cono a un espesor y diámetro uniforme, presionando la parte superior con el cucharón.
- El cono aplanado se separó en cuadrantes sensiblemente iguales con una regla y sobre una charola se juntó el material de dos cuadrantes opuestos.

3.3.3.5 LÍMITE LÍQUIDO DE LA MUESTRA DE ARCILLA

De la muestra de material secado, disgregado y cuarteado se apartó una porción de aproximadamente 300 gramos de material que pasó la malla No 40, posteriormente se separaron aproximadamente 250 gramos. Se colocó el material separado en un recipiente, se agregó agua hasta saturarlo y se dejó reposando por 24 horas.

Para determinar el límite líquido se siguió el siguiente procedimiento:

- De la fracción del material preparada, se tomaron aproximadamente 150 gramos, se colocó en una cápsula de porcelana donde se homogenizó con una espátula.
- En la copa Casagrande, se colocó una cantidad suficiente de material extendiéndolo con una espátula, se alcanzó un espesor entre 8-10 mm en la parte central de la copa.
- Se hizo una abertura en la parte central del material con un ranurador, manteniéndolo normal a la superficie interior de la copa.
- Posteriormente se accionó la manivela del aparato para hacer caer la copa a razón de dos golpes por segundo, registrando el número de golpes para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 mm.

- Se tomó con una espátula material de la porción cerrada de la ranura y se determinó el contenido de agua de acuerdo con el manual M-MMP-1-04/03 [51].
- Ya tomada la porción para determinar el contenido de agua, el material restante se reintegró a la cápsula de mezclado, para lavar y secar la copa, y el ranurador.
- Con un cuentagotas se agregó agua al material en la cápsula y se homogenizó con una espátula, y se repitió el procedimiento hasta completar cuatro determinaciones.



Figura 6 Límite líquido de la arcilla

3.3.3.6 CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA VOLCÁNICA

Para la ceniza volcánica se realizaron las pruebas de fluorescencia de rayos X cuyo método se establece en la norma NMX-E-572-02-2005, granulometría y densidad de sólidos antes de la molienda.

3.3.3.7 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y OBTENCIÓN DE MEZCLA ÓPTIMA

Se realizó un análisis detallado de la bibliografía correspondiente a la estabilización de arcillas con ceniza volcánica y cal y tomando en cuenta los parámetros críticos para proponer una mezcla óptima donde la arcilla cumpla con la norma establecida para terraplenes.

3.3.3.8 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA

Con base en la mezcla óptima se realizó el análisis de precio unitario del costo por metro cúbico de una estabilización con la cal óptima obtenida del método de Eades y Grim,

estabilización con cemento, retiro e incorporación de material de banco y el costo de la estabilización propuesta con la mezcla óptima de cal y ceniza volcánica.

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.4.1 CONTENIDO ÓPTIMO DE CAL Y DISEÑO DE MEZCLAS

Los resultados obtenidos de la prueba rápida de Eades y Grim como se puede ver en la tabla 3, y en la figura 3 se agregó cal hasta en un 7% obteniendo un valor de pH de 13.

Tabla 3 pH respecto a porcentajes de cal

% de cal	pH
3	10
4	11
5	12
6	13
7	13

Graficando e interpolando los puntos, se obtiene que el porcentaje óptimo de cal para estabilizar la arcilla es de 5.4% del peso de la arcilla. Ver figura 7.

En base al resultado anterior se realizó el diseño de las 4 mezclas el cual se realizará con un 2.7% de cal en todas sus muestras y se adicionará ceniza volcánica la cual variará en intervalos de 5% del peso de la arcilla hasta llegar al 30%.

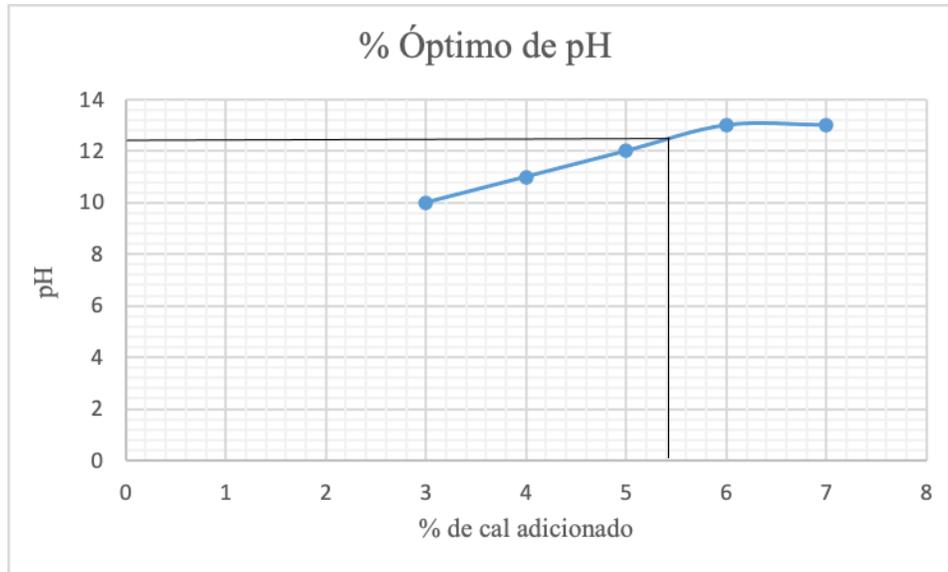


Figura 7 Puntos e interpolación para obtener el contenido óptimo de cal

Tabla 4 Cantidades de arcilla-cal-ceniza en las mezclas

Nombre de mezcla	Arcilla (kg)	Cal (kg)	Ceniza (kg)
Control	7.5	0	0
VA5	7.5	0.21	0.375
VA10	7.5	0.21	0.750
VA15	7.5	0.21	1.125
VA20	7.5	0.21	1.5
VA25	7.5	0.21	1.875
VA30	7.5	0.21	2.25

3.4.2 LÍMITE LÍQUIDO DE LA ARCILLA EN ESTADO NATURAL

En la prueba de límite líquido se obtuvieron los siguientes valores.

Tabla 5 Valores obtenidos en la prueba de límite líquido en arcilla en su estado natural

N° DE LATA	U1	SS 4	5A 12	5ª	F5
PESO DE SUELO HÚMEDO + LATA (gr.):	50.100	43.900	41.400	38.300	41.700
PESO DE SUELO SECO + LATA (gr.):	43.200	39.000	38.000	36.400	38.700
PESO DE LATA (gr.):	35.200	33.900	34.600	34.300	35.100
PESO DE SUELO SECO (gr.):	8.000	5.100	3.400	2.100	3.600

PESO DE AGUA (gr.):	6.900	4.900	3.400	1.900	3.000
CONTENIDO DE HUMEDAD (%):	86.250	96.078	100.000	90.476	83.333
Nº DE GOLPES:	27	17	14	19	32

En la figura 7 se grafican en el eje horizontal el número de golpes y en el eje vertical el contenido de humedad, así mismo se realiza una línea uniendo los puntos, el límite líquido se encuentra con el contenido de humedad que tiene la muestra en el golpe número 25. Dando como resultado un límite líquido de 89%.

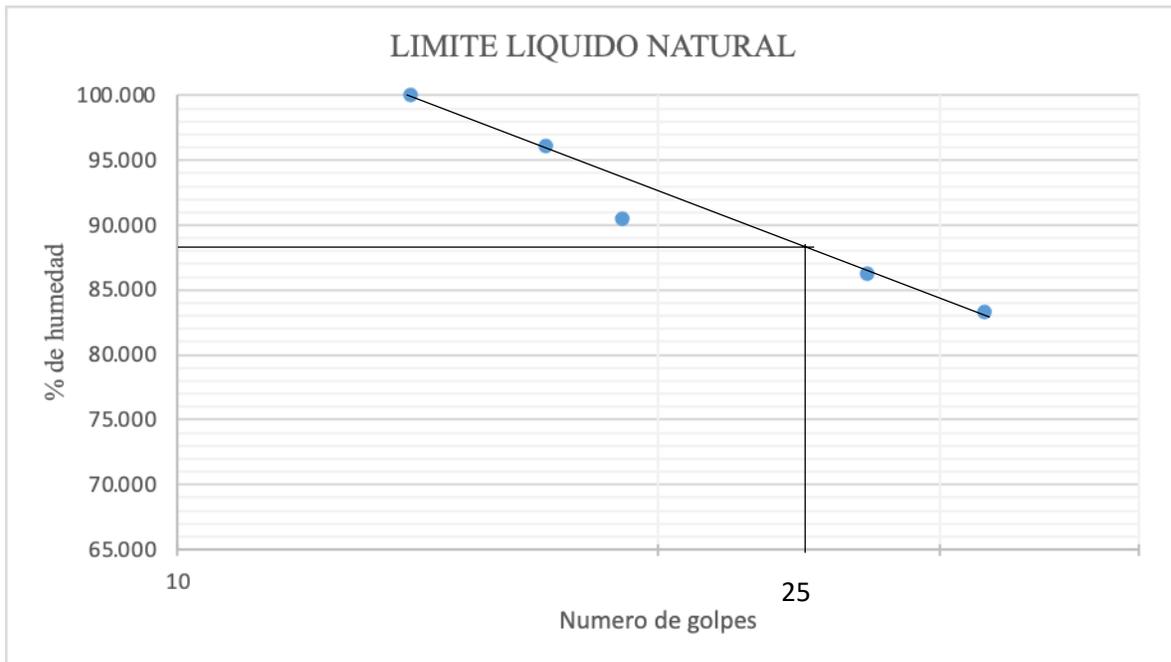


Figura 8 Obtención gráfica de límite líquido

3.4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA VOLCÁNICA

En la tabla 6, 7 y 8 se puede apreciar los componentes químicos de la ceniza volcánica así como su granulometría y densidad de sólidos dichas pruebas fueron realizadas por la Universidad de Colima la prueba de fluorescencia de rayos X y por el laboratorio SGS Durango la prueba de granulometría y densidad de sólidos.

Tabla 6 Composición química de la Ceniza Volcánica

Compuesto	%
SiO ₂	61.6
CaO	7.63
Al ₂ O ₃	21
SrO	0.1
MnO	0.11
FeO ₃	6.92
K ₂ O	1.38
WO ₃	0.03
TiO ₂	0.74
CuO	0.08

Tabla 7 Granulometría de la ceniza volcánica

Malla	Peso (g)	% Retenido individual	% Retenido acumulativo	% que pasa acumulativo
1/2"	138.6	7.9	7.9	92.1
3/8"	12.3	0.7	8.6	91.4
1/4"	20.3	1.2	9.8	90.2
6	35.1	2.0	11.8	88.2
10	35.7	2.0	13.9	86.1
20	147.0	8.4	22.3	77.7
50	572.9	32.8	55.1	44.9
70	247.6	14.2	69.3	30.7
100	221.7	12.7	82.0	18.0
140	143.0	8.2	90.1	9.9
200	87.7	5.0	95.2	4.8
Charola	84.4	4.8	100	0
Total	1746.3	100	-	-

Tabla 8 Densidad aparente con matraz Le-Chatelier

Muestra	Peso (g)	Volumen inicial (ml)	Volumen final (ml)	Gravedad Específica
Puente	50	0.6	19.3	2.67
Puente 1	50	0.5	19.1	2.69
Promedio				2.68

3.4.4 MEZCLA ÓPTIMA DE CENIZA-CAL-ARCILLA

Con base en el análisis de las diferentes pruebas realizadas en los artículos mostrados en la tabla 1 y 2 del estado del arte, se tomó como parámetro crítico al límite líquido ya que los otros parámetros de la norma N-CMT-1-01/16 [3] (CBR y expansión) se cumplían con mezclas con menor proporción de ceniza volcánica y cal, o con la misma proporción de ceniza volcánica y cal con la que se cumplía el parámetro del límite líquido los valores del CBR y expansión superaban en gran porcentaje lo establecido en la norma.

Ya que el parámetro crítico es el límite líquido se tomó en cuenta una relación entre la cantidad de ceniza volcánica agregada y dicho límite, encontrando en la amplia mayoría de artículos que a mayor ceniza volcánica agregada el límite líquido tiene una mayor disminución.

Por lo anterior y en base a la composición química de la ceniza volcánica del volcán de fuego que como se puede apreciar en la tabla 9 es muy parecida en sus componentes activos a la ceniza volcánica de la ciudad de Erzincan en Turquía estudiada en el artículo “Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite” [27] y a las de un Volcán en Indonesia estudiada en el artículo “Effect of Volcanic Ash Utilization as Substitution Material for Soil Stabilization in View Point of Geo-Environment” donde en el primer artículo muestra que se estabilizó una arcilla expansiva y pasar de un límite líquido de 87.2 hasta un valor muy cercano a 50 solo con el 30% de adición de ceniza volcánica tamizada por la malla No 200 sin adicionar cal. Así mismo, se observa que la ceniza utilizada en dicho artículo no presenta óxido de calcio y la del volcán de Colima presenta un 7.6% de este compuesto, favoreciendo a que las reacciones puzolánicas se presenten entre la arcilla y la ceniza volcánica estudiada en este proyecto. En el segundo artículo se muestra que el límite líquido de la arcilla baja de 80 a 62 adicionando 35% de arcilla tamizada por la malla No. 60 adicionando y 5% de cal. Observando también que la ceniza volcánica de Colima contiene el doble de óxido de calcio que la ceniza de Indonesia.

Tabla 9 Comparativa de los componentes activos de la ceniza volcánica.

Compuesto	% en CV Colíma	% en CV Turquía	% en CV Indonesia
SiO ₂	61.6	70.96	60.49
CaO	7.63	0.76	3.95
Al ₂ O ₃	21	13.4	21.97

Por lo tanto se considera que la adición del 30% de ceniza volcánica y 2.7% de cal del peso de la arcilla como la óptima para que cumpla con los parámetros de la norma N-CMT-1-01/16 [3]. Así mismo la ceniza volcánica deberá ser triturada hasta que pase por la malla 200, esto porque mientras más pequeño sea el tamaño del polvo de cenizas volcánicas, mejor será la reacción. La finura de las cenizas volcánicas es un factor primario por la reacción puzolánica en el proceso de estabilización [26].

Los parámetros de la norma que se esperan obtener al realizar la mezcla antes mencionada son:

Tabla 10 Valores esperados para la mezcla Ceniza-Cal-Arcilla

	Límite Líquido	CBR	Expansión
Valor en Norma	50	Mayor a 5%	Menor a 5%
Valor esperado	50	30 %	3%

3.4.5 FACTIBILIDAD ECONÓMICA

La tabla 11 muestra el costo directo por metro cúbico de material escarificado, mezclado, tendido y compactado con los estabilizadores tradicionales (cemento y cal), extrayendo e incorporando material de banco y con la mezcla óptima de arcilla-ceniza-cal. Dichos análisis de precios unitarios se encuentran en el anexo 1. Así mismo los costos horarios de la maquinaria se presentan en el anexo 2.

Dichos costos se realizaron tomando las siguientes consideraciones:

- Se utilizó un peso volumétrico de arcilla de 1800 kg/m³ para obtener los pesos de los estabilizadores, (cemento, cal y ceniza volcánica). Los cuales se consideraron como 102 kg por m³ para la estabilización con cal, 0.201 m³ de ceniza volcánica y

51 kg de cal por m³ de estabilización de ceniza volcánica y cal y 144 kg de cemento por m³ para la estabilización con cemento.

- Los bancos de desperdicio y de aprovechamiento de material se encuentran a 5 km cada uno de la obra, esto para ser considerado en los acarrees. Los cuales según el tabulador general de acarrees son \$14.00 el primer kilómetro y \$7.00 al kilómetro subsecuente.
- Los rendimientos de maquinaria son los mismos en todos los precios, considerando rendimientos por separado de escarificado, mezclado tendido y compactado de material. (150 m³/hora para escarificación, 160 m³/hora para mezclado, y 140 m³/hora para tendido de material, 130 m³/hora para la compactación)
- En el precio unitario de la estabilización con ceniza volcánica y cal se considera el costo horario de una trituradora para que esta ayude a triturar el material hasta que pase por la malla No. 200.
- No se contempla un acarreo por la ceniza volcánica ya que se realizará un análisis para saber hasta dónde es factible económicamente la propuesta considerando el costo del acarreo del estado de Colima.

Tabla 11 Costo directo por metro cúbico de diferentes estabilizaciones

Estabilización con cemento	Estabilización con cal	Extracción e incorporación de material de banco	Estabilización ceniza volcánica y cal
\$485.91	\$252.02	\$276.80	\$186.6

Considerando un costo por acarreo de \$14.00 por el primer kilómetro y de \$7.00 por el kilómetro subsecuente en el estado de Colima según el tabulador nacional de acarrees por m³ de material transportado [52] la propuesta de estabilización con ceniza volcánica y cal es factible económicamente respecto a la estabilización con cal hasta alcanzar un radio de 45 km, respecto a la extracción e incorporación de material de banco es factible hasta llegar a un radio de operación de 63 km y es factible utilizar este proceso en lugar de la estabilización con cemento a un radio de 211 km.

El análisis anterior se realizó de la siguiente manera, a la diferencia de costo entre las diferentes estabilizaciones se le resta el costo del primer km multiplicado por la cantidad de ceniza que se necesita para estabilizar un m³ de material el cual es 0.201 m³ el cual se obtiene de dividir el 30% del peso de la arcilla por m³ el cual es 540 kg entre la gravedad específica de la ceniza volcánica la cual es 2.68. La multiplicación del costo del primer km por la cantidad de ceniza que se necesita para un m³ de material es de \$2.81, de la misma manera de multiplicará el costo del kilómetro subsecuente por 0.201 obteniendo \$1.41, este costo se dividirá entre el resultante de la resta de la diferencia de costos y el costo del primer km

Tabla 12 Análisis de factibilidad económica (Radio de factibilidad)

Estabilización ceniza volcánica y cal	Estabilización con cemento	Estabilización con cal	Extracción e incorporación de material de banco
\$186.6	\$485.91	\$252.02	\$276.80
DIFERENCIA DE COSTO	\$299.31	\$65.42	\$90.2
SE RESTA COSTO DE PRIMER KM (\$2.81)	\$296.5	\$62.61	\$87.39
DIVISIÓN DE COSTO DE KM SUBSECUENTE (\$1.41) ENTRE RESULTANTE	210	44	62
RADIO DE FACTIBILIDAD	211	45	63

4 ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN

4.1 PLAN DE ACCIÓN

El primer paso para la implementación de este proyecto es dar a conocer el uso que se le puede dar a la ceniza volcánica como estabilizador de suelos en regiones cercanas a donde se pueda explotar dicho material. Así mismo se deberá de proponer el uso con empresas constructoras de proyectos carreteros e inmobiliarios donde el material que se encuentre en el sitio no cumpla con las características que se requieran.

4.2 ESTRATEGIAS USADAS PARA PRESENTAR Y PERSUADIR A LOS INVOLUCRADOS EN EL PROYECTO

Para implementar el proyecto de intervención se presentaran los resultados esperados y mejoras que se esperan en el material mezclado y en base a eso proponer a un laboratorio de materiales que elabore las pruebas necesarias para encontrar la proporción óptima de ceniza volcánica y cal para que el material cumpla con las características que marca la norma N-CMT-1-01/16 [3] para terraplenes.

Se realizó un reporte técnico para que los interesados conocieran las pruebas y estudios realizados así como las ventajas económicas y ambientales que presenta la ceniza frente a los estabilizadores tradicionales.

Se necesita generar para la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT la Manifestación de Impacto Ambiental conocida como la MIA, para poder explotar las faldas del volcán como banco de material, obteniendo puntos a favor como por retirar material que puede ser nocivo para la salud humana al estar mucho tiempo expuesto al mismo, utilizar materiales naturales que no han sido aprovechados, no abrir nuevos bancos de extracción, entre otros que se mencionan en este documento.

5 ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO

5.1 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En la tabla 13 se presentan las actividades que se deberán realizar para elaborar una capa estabilizada de terraplén de 30 cm en un tramo de prueba de 1 km con un ancho de 6 metros teniendo un total de 1800 m³ de arcilla estabilizada con un 30% de ceniza volcánica y 3% de cal. Con los mismos rendimientos presentados en los precios unitarios mostrados en el Anexo 1. Suponiendo un tramo de carretera que se encuentre a 30 km de distancia del volcán.

Tabla 13 Cronograma de actividades

Actividad	Duración
Estudio geotécnico	6 semanas
Acarreo de 371 m ³ de ceniza volcánica y de 91.85 ton de cal	2 días
Escarificado, homogeneizado, tendido y compactado de material	8 días

5.2 RECURSOS

Los recursos para la implementación de un tramo de 1 km de prueba que son: el documento del laboratorio que avala que la mezcla de material cumple con la norma de terraplenes, y el costo unitario del metro cúbico de material incluyendo el acarreo de 30 km de ceniza volcánica al sitio de la obra. No se contempla costo de acarreo de la cal ya que la cotización realizada fue de material puesto en obra. Se presenta el costo de las actividades en la siguiente tabla.

Tabla 14 Recursos

Actividad	Importe
Estudio geotécnico	\$10,000.00
Acarreo de 371 m ³ de ceniza volcánica 30 km	\$80,507.00
Estabilización con ceniza y cal	\$335,880.00

Dando un total de \$426,387.00 para la implementación de este proyecto en un tramo de prueba. Realizando una comparativa del importe con el mismo volumen de obra la cual se puede observar en la tabla 13 los métodos de estabilización tradicional resultan más costosos.

Tabla 15 Comparativa de costo con métodos tradicionales de estabilización.

Método	Importe
Estabilización con cemento	\$884,638.00
Estabilización con cal	\$463,636.00
Extracción e incorporación de material de banco	\$508,240.00

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

En base al análisis realizado en este estudio se concluye que la ceniza volcánica es efectiva como material estabilizador mezclada con porcentajes de cal en un rango de 30% de CV respecto al peso de la arcilla y la mitad del porcentaje óptimo de cal, ya que como se menciona en el documento la ceniza volcánica por sí misma no tiene una reacción química suficiente para ligar las partículas del suelo y obtener una mejora sustancial en el suelo arcilloso que permita utilizarlo como una capa de terraplén.

Las ventajas que se observaron en el transcurso del desarrollo del proyecto de intervención para la implementación de este material natural como estabilizador son:

- Mitigación de la apertura de nuevos bancos de extracción y vertido de material.
- Bajo costo en la implementación de este material como estabilizador.
- Aminorar el uso de materiales estabilizadores de suelo convencionales como la cal y el cemento los cuales en su producción generan grandes emisiones de CO₂ a la atmósfera.
- Alta disponibilidad y alcance del material.
- Al utilizar el material la población se verá beneficiada.

Las desventajas a destacar de la implementación de la ceniza volcánica como estabilizador son:

- Falta de estudios de la ceniza volcánica como estabilizador de suelos en la región.
- Para cada tipo de suelo de deberán realizar pruebas para ajustar la dosificación.
- La trituración y/o molienda del material puede generar una excesiva nube de polvos la cual es dañina para la salud.
- Dificultad de trabajar con los suelos arcillosos, lo cual complica el proceso constructivo.
- Es de mucha importancia destacar que se debe de hacer uso de los materiales que sean proporcionados por la naturaleza, y empezar a realizar más estudios de este tipo para que se pueda sacar el mejor provecho de un recurso que hasta el momento en la región no es utilizado en masa para fines constructivos.

6.2 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que surgen del análisis realizado y de las obstrucciones que se tuvieron para llevar a cabo el presente proyecto para continuar con los estudios y ensayos de laboratorio, son las siguientes:

- Realizar las pruebas de límite líquido, CBR, y expansión con la proporción propuesta en el documento para verificar que la mezcla cumpla con la norma N-CMT-1-01/16 [3].
- Hacer ensayos con un material arcilloso de mejores características, sin moler ni tamizar la ceniza, con el fin de evitar la generación de polvos.
- Al hacer los ensayos poner especial atención en el tiempo de curado ya que es importante dejar que se produzcan las reacciones puzolánicas y así conocer el verdadero potencial del suelo.
- Analizar mezclas para compararlas con los parámetros de la norma N-CMT-1-03/02 [53] para materiales de subrasante.
- Realizar una evaluación de impacto ambiental tomando en cuenta las ventajas mencionadas anteriormente, el cual puede ser de gran impacto para los interesados en el proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. Kavak, A. and G. Baykal, *Long-term behavior of lime-stabilized kaolinite clay*. Environmental earth sciences, 2012. 66(7): p. 1943-1955.
2. Petry, T.M. and D.N. Little, *Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures—history, practice, and future*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002. 14(6): p. 447-460.
3. SCT, *Materiales para Terraplén*. 2016.
4. Espinosa-Santiago, A. and N. López-Acosta, *Performance monitoring and numerical assessment of a test embankment with preloading and vertical drains on Texcoco lacustrine soft clays*. Geotextiles and Geomembranes, 2020.
5. del Pino, J.M.J. and E.T. Piusseaut, *Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras*. Revista de Arquitectura e Ingeniería, 2011. 5(2).
6. Ghadir, P. and N. Ranjbar, *Clayey soil stabilization using geopolymers and Portland cement*. Construction and Building Materials, 2018. 188: p. 361-371.
7. Yi, Y., et al., *Magnesia reactivity on activating efficacy for ground granulated blastfurnace slag for soft clay stabilisation*. Applied Clay Science, 2016. 126: p. 57-62.
8. Reforma, A., *Encarecen materiales para la construcción*. Zócalo, 2020.
9. Contaminación, O.E.d.P.y.C.I.d.l., *Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio*. 2011.
10. Vargas, E.U., *ANÁLISIS DEL RESIDUO DE CONCRETO FRESCO DE PLANTA DOSIFICADORA DE CONCRETO DE CULIACÁN, SINALOA; COMO ESTABILIZANTE DE ARCILLA PARA USO EN TERRAPLÉN*. 2018: p. 100.
11. Villalaz, C.C., *Mecánica de suelos y cimentaciones*. 2004: Editorial Limusa.
12. Verdú, A., *COMPACTACION DE TERRENOS: TERRAPLENES Y PEDRAPLENES*. 1977: Reverte.
13. Badillo, E.J., *Mecánica de suelos*. Vol. 2. 2001: Editorial Limusa.
14. Bell, F.G., *Methods of treatment of unstable ground*. 2013: Elsevier.
15. Doroteo Cid, C., *Mejoramiento de suelo por sustitución de material*. 2014.

16. Ortega, A., *Mejoramiento de suelos en base a los metodos de vibroflotación y vibrosustitución*. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfciq.6m/doc/bmfciq.6m.pdf>, 2008.
17. de Solminihac, H., G. Echeverría, and G. Thenoux, *Estabilización Química de Suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos*. Revista Ingeniería de construcción, 2012(6): p. 53-78.
18. Agua, C.N.d., *GEOTECNIA EN SUELOS INESTABLES* 2007.
19. FINANCIERO, E., *Estos son los 12 volcanes activos en México*. EL FINANCIERO, 2018.
20. ASTM, A., *D6276-99a—standard test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization*. ASTM International, West Conshohocken, 1999.
21. Sandoval, C.H.H., J.C.G. Cristancho, and Ó.E.P. Naranjo, *Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio*. Facultad de Ingeniería, 2012. 21(32): p. 21-40.
22. Saride, S., A.J. Puppala, and S.R. Chikyala, *Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays*. Applied Clay Science, 2013. 85: p. 39-45.
23. Sakr, M.A., M.A. Shahin, and Y.M. Metwally, *Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content*. Geotechnical and Geological Engineering, 2009. 27(1): p. 105.
24. Cheng, Y., et al., *Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans*. Construction and Building Materials, 2018. 187: p. 1031-1038.
25. Hastuty, I.P., T.A. Sofyan, and Roesyanto. *The influence of using quicklime and volcanic ash as stabilizing materials in clay viewed from CBR value*. in *AIP Conference Proceedings*. 2017. AIP Publishing LLC.
26. Rifa'i, A. and N. Yasufuku, *Effect of Volcanic Ash Utilization as Substitution Material for Soil stabilization in View Point of Geo-Environment*, in *Ground Improvement and Geosynthetics*. 2014. p. 138-147.

27. Calik1a, U. and E. Sadoglu, *Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite*. 2014.
28. Al-Swaidani, A., I. Hammoud, and A. Meziab, *Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016. 8(5): p. 714-725.
29. Hastuty, I., R. Roesyanto, and S. Napitupulu, *Clay Stabilization Using the Ash of Mount Sinabung in Terms of the Value of California Bearing Ratio (CBR)*. MS&E, 2018. 306(1): p. 012060.
30. Latif, D.O., A. Rifa'i, and K.B. Suryolelono, *Effect of Kelud volcanic ash utilization on the physical properties as stabilizer material for soil stabilization*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2016. 20(26): p. 1679-1687.
31. Syahril, S., A. Somantri, and A. Haziri, *Study of stabilized soil clay soil characteristics using vulcanic ash and tailing as subgrade layers*.
32. Hossain, K. and L. Mol, *Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes*. Construction and Building Materials, 2011. 25(8): p. 3495-3501.
33. de Pablo, L., *LAS ARCILLAS. I. CLASIFICACION, IDENTIFICACION, USOS Y ESPECIFICACIONES INDUSTRIALES*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 1964. 27(2): p. 49-91.
34. Schreiner, T. *Fabricación de cal en Mesoamérica: Implicaciones para los Mayas del Preclásico en Nakbe, Petén*. in *XIV Simposio de investigaciones arqueológicas en Guatemala*. 2001.
35. Harmsen, T.E., *Diseño de estructuras de concreto armado*. 2005: Fondo editorial PUCP.
36. de Guzmán, D.S., *Tecnología del concreto y del mortero*. 2001: Pontificia Universidad Javeriana.
37. 150-07, A.C. *Standard Specifications for Portland Cement*. 2007. American Society for Testing and Materials West Conshohocken, PA.
38. Astm, C., *125 Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates*. Annual Book of ASTM Standards, 2003. 4.

39. Snellings, R., G. Mertens, and J. Elsen, *Supplementary cementitious materials*. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2012. 74(1): p. 211-278.
40. C618, A. *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. in *American Society of Testing and Materials*. 2008. West Conshohocken Pennsylvania, USA.
41. Thomas, M., *Supplementary cementing materials in concrete*. 2013: CRC press.
42. Behnood, A., *Soil and clay stabilization with calcium-and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques*. Transportation Geotechnics, 2018. 17: p. 14-32.
43. Akula, P. and D.N. Little, *Analytical tests to evaluate pozzolanic reaction in lime stabilized soils*. MethodsX, 2020: p. 100928.
44. Puy Santín, A.J., *Influencia de la temperatura en el límite líquido para suelos con diferentes índices de plasticidad*. 2005.
45. SCT, *Límites de Consistencia*. 2007.
46. Solano, A. and A. Andres, *Determinación del CBR de Laboratorio y natural en suelos finos y su correlación con el DCP para la determinación de la capacidad portante de la sub-rasante, en el diseño de pavimentos flexibles de la Ciudad de Quito*. 2013.
47. de la Federación, D.O., *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)*. Reforma actual. México, 2012. 4.
48. PEREZ GARCIA, N., A. PEREZ SALAZAR, and P. GARNICA ANGUAS, *EVALUACION DEL OXIDO DE CALCIO (ESTABILICAL) COMO ESTABILIZADOR DE SUELOS*. PUBLICACION TECNICA, 2019(560).
49. SCT, *Muestreo de Materiales para Terracerías*. 2003.
50. SCT, *Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras*. 2003.
51. SCT, *Contenido de Agua*. 2003.
52. Sindicato Nacional de Trabajadores de la Construcción, T., *Conexos y Similares de México., Tabulador Nacional de Acarreos*. 2020.
53. SCT, *Materiales para Subrasante*. 2002.

ANEXOS

A1-

Presupuesto

1 A1- ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Análisis de Precio Unitario

Descripción

Clave: P11

CONSTRUCCION DE CAPA DE TERRAPLEN FORMADA CON EL TERRENO NATURAL EXISTENTE, ESTABILIZADO CON 6% DE CAL HIDRATADA, ESCARIFICADO, HOMOGENEIZADO, TENDIDO Y COMPACTACIÓN AL 90% PUOT

Unidad: M3
 Cantidad: 1,800.00
 Precio unitario: \$ 252.02
 Total: \$ 453,636.00

C Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total
Materiales					
CALHI	CAL HIDRATADA	TON	0.10206	\$ 1,800.00	\$ 183.71
AG	AGUA	M3	0.20000	\$ 50.00	\$ 10.00
Total de Materiales					\$ 193.71
Mano de Obra					
PEON01	PEON DE OBRA NEGRA	jor	0.02000	\$ 340.90	\$ 6.82
Total de Mano de Obra					\$ 6.82
Equipo					
H MOTO1	MOTOCONFORMADORA 140K CON	hora	0.00867	\$ 1,351.59	\$ 9.02
H MOTO1	MOTOCONFORMADORA 140K CON	hora	0.00825	\$ 1,351.59	\$ 8.45
H MOTO1	MOTOCONFORMADORA 140K CON	hora	0.00714	\$ 1,351.59	\$ 9.65
H VIBRO	VIBROCOMPACTADOR INGERSOLL RANDSD 100DTF	hora	0.00769	\$ 720.16	\$ 5.54
H PIPA	CAMION PIPA DE 8000 LTS SOBRE CHASIS MERCEDEZ BENZ 170 HP	hora	0.03333	\$ 564.88	\$ 18.83
Total de Equipo					\$ 51.49

Costo Directo	\$	252.02
Indirectos (0.00%)	\$	0.00
Indirectos de Campo (0.00%)	\$	0.00
Subtotal	\$	252.02
Financiamiento (0.00%)	\$	0.00
Subtotal	\$	252.02
Utilidad (0.00%)	\$	0.00
Cargos Adicionales (0.00%)	\$	0.00

Precio Unitario \$ 252.02

** DOSCIENTOS CINCUENTA Y DOS PESOS 02/100 M.N. **

Análisis de Precio Unitario

Descripción

Clave: PI2
 CONSTRUCCION DE CAPA DE TERRAPLEN FORMADA CON MATERIAL DE BANCO, INCLUYE
 RETIRO DE MATERIAL, EXTRACCION DE MATERIAL DE BANCO, CONFORMACION Y
 COMPACTACION DE MATERIAL DE BANCO PUOT

Unidad : M3
 Cantidad : 1,800.00
 Precio unitario : \$ 276.80
 Total : \$ 498,240.00

C Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total
Materiales					
AG	AGUA	M3	0.20000	\$ 50.00	\$ 10.00
ACAR02	TARIFA DE UNION DE CAMIONES KILOMETRO SUBSECUENTE	M3	4.80000	\$ 7.00	\$ 33.60
TERR	MATERIAL PARA TERRAPLEN	M3	1.20000	\$ 90.00	\$ 108.00
ACAR01	TARIFA UNION DE CAMIONES AL PRIMER KILOMETO	M3	1.20000	\$ 14.00	\$ 16.80
ACAR02	TARIFA DE UNION DE CAMIONES KILOMETRO SUBSECUENTE	M3	4.80000	\$ 7.00	\$ 33.60
ACAR01	TARIFA UNION DE CAMIONES AL PRIMER KILOMETO	M3	1.20000	\$ 14.00	\$ 16.80
Total de Materiales					\$ 218.80
Equipo					
H EXC320	EXCAVADORA CATERPILLAR 320D	hora	0.01250	\$ 1,242.39	\$ 15.53
H MOTO1	MOTOCONFORMADORA 140K CON 185HP Y HOJA DE 3.7M	hora	0.00625	\$ 1,351.59	\$ 8.45
H MOTO1	MOTOCONFORMADORA 140K CON 185HP Y HOJA DE 3.7M	hora	0.00714	\$ 1,351.59	\$ 9.65
H VIBRO	VIBROCOMPACTADOR INGERSOLL RANDSD 100DTF	hora	0.00769	\$ 720.16	\$ 5.54
H PIPA	CAMION PIPA DE 8000 LTS SOBRE CHASIS MERCEDEZ BENZ 170 HP	hora	0.03333	\$ 564.88	\$ 18.83
Total de Equipo					\$ 58.00

Costo Directo	\$	276.80
Indirectos (0.00%)	\$	0.00
Indirectos de Campo (0.00%)	\$	0.00
Subtotal	\$	276.80
Financiamiento (0.00%)	\$	0.00
Subtotal	\$	276.80
Utilidad (0.00%)	\$	0.00
Cargos Adicionales (0.00%)	\$	0.00

Precio Unitario \$ 276.80

** DOSCIENTOS SETENTA Y SEIS PESOS 80/100 M.N. **

Análisis de Precio Unitario

Descripción

Clave: P13

CONSTRUCCION DE CAPA DE TERRAPLEN FORMADA CON EL TERRENO NATURAL EXISTENTE, ESTABILIZADO CON 2.7% DE CAL HIDRATADA Y CENIZA VOLCÁNICA, ESCARIFICADO, HOMOGENEIZADO, TENDIDO Y COMPACTACIÓN AL 90% PUOT

Unidad : M3
 Cantidad : 1,800.00
 Precio unitario : \$ 186.60
 Total : \$ 335,880.00

C	Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total
Materiales						
	AG	AGUA	M3	0.20000	\$ 50.00	\$ 10.00
	CENI	CENIZA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN DE COLIMA	M3	0.20100	\$ 100.00	\$ 20.10
	CALHI	CAL HIDRATADA	TON	0.05103	\$ 1,800.00	\$ 91.85
Total de Materiales						\$ 121.95
Mano de Obra						
	PEON01	PEON DE OBRA NEGRA	jor	0.02000	\$ 340.90	\$ 6.82
Total de Mano de Obra						\$ 6.82
Equipo						
F	PIPA	CAMION PIPA DE 8000 LTS SOBRE CHASIS MERCEDEZ BENZ 170 HP	hora	0.03333	\$ 564.88	\$ 18.83
F	TRIT	EQUIPO DE TRITURACIÓN Y CRIBADO DE MATERIAL PETTIBONE 880	hora	0.01250	\$ 507.12	\$ 6.34
F	VIBRO	VIBROCOMPACTADOR INGERSOLL RANDSD 100DTF	hora	0.00769	\$ 720.16	\$ 5.54
F	MOTO1	MOTOCONFORMADORA 140K CON 185HP Y HOJA DE 3.7M	hora	0.00714	\$ 1,351.59	\$ 9.65
F	MOTO1	MOTOCONFORMADORA 140K CON 185HP Y HOJA DE 3.7M	hora	0.00825	\$ 1,351.59	\$ 8.45
F	MOTO1	MOTOCONFORMADORA 140K CON 185HP Y HOJA DE 3.7M	hora	0.00867	\$ 1,351.59	\$ 9.02
Total de Equipo						\$ 57.83

Costo Directo	\$	186.60
Indirectos (0.00%)	\$	0.00
Indirectos de Campo (0.00%)	\$	0.00
Subtotal	\$	186.60
Financiamiento (0.00%)	\$	0.00
Subtotal	\$	186.60
Utilidad (0.00%)	\$	0.00
Cargos Adicionales (0.00%)	\$	0.00
Precio Unitario	\$	186.60

**** CIENTO OCHENTA Y SEIS PESOS 60/100 M.N. ****

Análisis de Precio Unitario

Descripción

Clave: PI4

CONSTRUCCION DE CAPA DE TERRAPLEN FORMADA CON EL TERRENO NATURAL EXISTENTE, ESTABILIZADO CON 8% DE CEMENTO, ESCARIFICADO, HOMOGENEIZADO, TENDIDO Y COMPACTACION AL 90% PUOT

Unidad: M3
 Cantidad: 1,800.00
 Precio unitario: \$ 485.91
 Total: \$ 874,638.00

C Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total
Materiales					
AG	AGUA	M3	0.20000	\$ 50.00	\$ 10.00
CEM1	CEMENTO PORTLAND GRIS	TON	0.14400	\$ 2,900.00	\$ 417.60
Total de Materiales					\$ 427.60
Mano de Obra					
PEON01	PEON DE OBRA NEGRA	jor.	0.02000	\$ 340.90	\$ 6.82
Total de Mano de Obra					\$ 6.82
Equipo					
H PIPA	CAMION PIPA DE 8000 LTS SOBRE CHASIS MERCEDEZ BENZ 170 HP	hora	0.03333	\$ 564.88	\$ 18.83
H VIBRO	VIBROCOMPACTADOR INGERSOLL RANDSD 100DTF	hora	0.00789	\$ 720.16	\$ 5.54
H MOTO1	MOTOCONFORMADORA 140K CON 185HP Y HOJA DE 3.7M	hora	0.00714	\$ 1,351.59	\$ 9.65
H MOTO1	MOTOCONFORMADORA 140K CON 185HP Y HOJA DE 3.7M	hora	0.00825	\$ 1,351.59	\$ 8.45
H MOTO1	MOTOCONFORMADORA 140K CON 185HP Y HOJA DE 3.7M	hora	0.00887	\$ 1,351.59	\$ 9.02
Total de Equipo					\$ 51.49

Costo Directo	\$	485.91
Indirectos (0.00%)	\$	0.00
Indirectos de Campo (0.00%)	\$	0.00
Subtotal	\$	485.91
Financiamiento (0.00%)	\$	0.00
Subtotal	\$	485.91
Utilidad (0.00%)	\$	0.00
Cargos Adicionales (0.00%)	\$	0.00

Precio Unitario \$ 485.91

** CUATROCIENTOS OCHENTA Y CINCO PESOS 91/100 M.N. **

2 A-2 COSTOS HORARIOS DE MAQUINARIA

Costo Horario de Equipo

Descripción

Clave: EXC320

EXCAVADORA CATERPILLAR 320D

Unidad : hora

Fecha : 05/May/2020

Datos Generales

Vad = Valor de adquisición =	5093605.68 \$	Pnom = Potencia nominal =	0.00000 hp
Pn = Valor de llantas =	0.00 \$	Tipo de combustible:	Diesel
Pa = Valor de piezas especiales =	0.00 \$	Pc = Precio del combustible =	20.15 \$ litro
Vm = Valor neto = Vad-Pn-Pa =	5093605.68 \$		
r = Factor de rescate =	0.20000		
Vr = Valor de rescate = Vm*r =	1018721.14 \$		
i = Tasa de interés =	14.50 % anual		
s = Prima de seguros =	2.00 % anual	Pac = Precio del aceite =	86.21 \$ litro
Ko = Factor de mantenimiento =	1.00000	Vn = Vida económica de llantas =	4000.00 hrs
Ve = Vida económica =	16000.00 hrs		
Va = Vida económica de piezas especiales =	1000.00 hrs	Gh = Cantidad de combustible =	17.68000 lts/hr
Hea = Tiempo trabajado por año =	2000.00 hrs	Ah = Cantidad de aceite =	0.46000 lts/hr

Clave	Fórmula	Operaciones	Total
Cargos Fijos			
Depreciación:	$D = (Vm - Vr) / Ve =$	$(5093605.68 - 1018721.14) / 16000.00 =$	\$ 254.68
Inversión:	$Im = [(Vm + Vr) / 2Hea] =$	$[(5093605.68 + 1018721.14) / 2 * 2000.00] * 0.145000 =$	\$ 222.95
Seguros:	$Sm = [(Vm + Vr) / 2Hea] * s =$	$[(5093605.68 + 1018721.14) / 2 * 2000.00] * 0.020000 =$	\$ 30.56
Mantenimiento:	$Mn = Ko * D =$	$1.00000 * 254.68 =$	\$ 254.68
		Total de Cargos Fijos	\$ 762.87
Consumos			
COMBUSTIBLES	$Co = Gh * Pc =$	$17.68000 * 20.15 =$	\$ 356.25
LUBRICANTES	$Lb = Ah * Pac =$	$0.46000 * 86.21 =$	\$ 39.66
		Total de Consumos	\$ 395.91
Operación			
	$Sn =$ Salario tabulado = \$400.00		
	$Fsr =$ Factor de salario real = 1.67212		
	$Sr =$ Salario real de operación = $Sn * Fsr =$ \$668.85		
	$Ht =$ Horas efectivas por turno de trabajo = 8.00		
CHOF2	$Po = Sr / Ht =$	$668.85 / 8.00 =$	\$ 83.61
		Total de Operación	\$ 83.61
		Costo Horario	\$ 1,242.39

Costo Horario de Equipo

Descripción

Clave: MOTO1
MOTOCONFORMADORA 140K CON 185HP Y HOJA DE 3.7M

Unidad : hora
Fecha : 05/May/2020

Datos Generales

Vad = Valor de adquisición =	7871339.07 \$	Pnom = Potencia nominal =	0.00000 hp
Pn = Valor de llantas =	0.00 \$	Tipo de combustible:	Diesel
Pa = Valor de piezas especiales =	0.00 \$	Pc = Precio del combustible =	20.15 \$ litro
Vm = Valor neto = Vad-Pn-Pa =	7871339.07 \$		
r = Factor de rescate =	0.20000		
Vr = Valor de rescate = Vm*r =	1574267.81 \$		
i = Tasa de interés =	14.59 % anual		
s = Prima de seguros =	2.00 % anual	Pac = Precio del aceite =	0.00 \$ litro
Ko = Factor de mantenimiento =	0.80000	Vn = Vida económica de llantas =	3000.00 hrs
Ve = Vida económica =	16000.00 hrs		
Va = Vida económica de piezas especiales =	0.00 hrs	Gh = Cantidad de combustible =	22.40000 lts/hr
Hea = Tiempo trabajado por año =	8000.00 hrs	Ah = Cantidad de aceite =	0.53400 lts/hr

Clave	Fórmula	Operaciones	Total
Cargos Fijos			
Depreciación:	$D = (Vm - Vr) / Ve =$	$(7871339.07 - 1574267.81) / 16000.00 =$	\$ 393.57
Inversión:	$Im = [(Vm + Vr) / 2 * Hea] * i =$	$[(7871339.07 + 1574267.81) / 2 * 8000.00] * 0.145900 =$	\$ 86.13
Seguros:	$Sm = [(Vm + Vr) / 2 * Hea] * s =$	$[(7871339.07 + 1574267.81) / 2 * 8000.00] * 0.020000 =$	\$ 11.81
Mantenimiento:	$Mn = Ko * D =$	$0.80000 * 393.57 =$	\$ 314.86
		Total de Cargos Fijos	\$ 806.37
Consumos			
COMBUSTIBLES	$Co = Gh * Pc =$	$22.40000 * 20.15 =$	\$ 451.36
		Total de Consumos	\$ 451.36
Operación			
	$Sn =$ Salario tabulado = \$450.00		
	$Fsr =$ Factor de salario real = 1.66854		
	$Sr =$ Salario real de operación = $Sn * Fsr =$ \$750.84		
	$Ht =$ Horas efectivas por turno de trabajo = 8.00		
OPEMOTO	$Po = Sr / Ht =$	$750.84 / 8.00 =$	\$ 93.86
		Total de Operación	\$ 93.86
		Costo Horario	\$ 1,351.59

Costo Horario de Equipo

Descripción

Clave: PIPA
CAMION PIPA DE 8000 LTS SOBRE CHASIS MERCEDEZ BENZ 170 HP

Unidad : hora
Fecha : 04/Dic/2018

Datos Generales

Vad = Valor de adquisición =	400000.00 \$	Pnom = Potencia nominal =	140.00000 hp
Pn = Valor de llantas =	10500.00 \$	Tipo de combustible:	Diesel
Pa = Valor de piezas especiales =	0.00 \$	Pc = Precio del combustible =	20.15 \$ litro
Vm = Valor neto = Vad-Pn-Pa =	389500.00 \$		
r = Factor de rescate =	0.00200		
Vr = Valor de rescate = Vm*r =	779.00 \$		
i = Tasa de interés =	29.30 % anual		
s = Prima de seguros =	3.00 % anual	Pac = Precio del aceite =	88.21 \$ litro
Ko = Factor de mantenimiento =	1.00000	Vn = Vida económica de llantas =	3000.00 hrs
Ve = Vida económica =	8750.00 hrs		
Va = Vida económica de piezas especiales =	1000.00 hrs	Gh = Cantidad de combustible =	17.00000 lts/hr
Hea = Tiempo trabajado por año =	1750.00 hrs	Ah = Cantidad de aceite =	0.25500 lts/hr
K = Coeficiente de almacenaje =	0.20000		

Clave	Fórmula	Operaciones	Total
Cargos Fijos			
Depreciación:	$D = (Vm - Vr) / Ve =$	$(389500.00 - 779.00) / 8750.00 =$	\$ 44.43
Inversión:	$Im = [(Vm + Vr) / 2Hea]i =$	$[(389500.00 + 779.00) / 2 * 1750.00] * 0.293000 =$	\$ 32.67
Seguros:	$Sm = [(Vm + Vr) / 2Hea]s =$	$[(389500.00 + 779.00) / 2 * 1750.00] * 0.030000 =$	\$ 3.35
Mantenimiento:	$Mn = Ko * D =$	$1.00000 * 44.43 =$	\$ 44.43
Almacenamiento:	$A = K * D =$	$0.20000 * 44.43 =$	\$ 8.89
		Total de Cargos Fijos	\$ 133.77
Consumos			
COMBUSTIBLES	$Co = Gh * Pc =$	$17.00000 * 20.15 =$	\$ 342.55
LUBRICANTES	$Lb = Ah * Pac =$	$0.25500 * 88.21 =$	\$ 21.98
LLANTAS	$N = Pn / Vn =$	$10500.00 / 3000.00 =$	\$ 3.47
		Total de Consumos	\$ 368.00
Operación			
	$Sn =$ Salario tabulado = \$300.00		
	$Fsr =$ Factor de salario real = 1.68292		
	$Sr =$ Salario real de operación = $Sn * Fsr =$ \$504.88		
	$Ht =$ Horas efectivas por turno de trabajo = 8.00		
OPPIPA	$Po = Sr / Ht =$	$504.88 / 8.00 =$	\$ 63.11
		Total de Operación	\$ 63.11
		Costo Horario	\$ 564.88

Costo Horario de Equipo

Descripción

Clave: TRIT
EQUIPO DE TRITURACIÓN Y CRIBADO DE MATERIAL PETTIBONE 880

Unidad : hora
Fecha : 08/Jul/2020

Datos Generales

Vad = Valor de adquisición =	1800000.00 \$	Pnom = Potencia nominal =	150.00000 hp
Pn = Valor de llantas =	0.00 \$	Tipo de combustible:	Diesel
Pa = Valor de piezas especiales =	0.00 \$	Pc = Precio del combustible =	20.15 \$ litro
Vm = Valor neto = Vad-Pn-Pa =	1800000.00 \$		
r = Factor de rescate =	0.20000		
Vr = Valor de rescate = Vm*r =	360000.00 \$		
i = Tasa de interés =	12.25 % anual		
s = Prima de seguros =	3.85 % anual	Pac = Precio del aceite =	88.21 \$ litro
Ko = Factor de mantenimiento =	0.20000	Vn = Vida económica de llantas =	4000.00 hrs
Ve = Vida económica =	20000.00 hrs		
Va = Vida económica de piezas especiales =	1000.00 hrs	Gh = Cantidad de combustible =	13.00000 lts/hr
Hea = Tiempo trabajado por año =	3600.00 hrs	Ah = Cantidad de aceite =	0.08500 lts/hr
K = Coeficiente de almacenaje =	0.80000		

Clave	Fórmula	Operaciones	Total
Cargos Fijos			
Depreciación:	$D = (Vm - Vr) / Ve =$	$(1800000.00 - 360000.00) / 20000.00 =$	\$ 72.00
Inversión:	$Im = [(Vm + Vr) / 2Hea] i =$	$[(1800000.00 + 360000.00) / 2 * 3600.00] * 0.122500 =$	\$ 36.75
Seguros:	$Sm = [(Vm + Vr) / 2Hea] s =$	$[(1800000.00 + 360000.00) / 2 * 3600.00] * 0.038500 =$	\$ 11.55
Mantenimiento:	$Mn = Ko * D =$	$0.20000 * 72.00 =$	\$ 14.40
Almacenamiento:	$A = K * D =$	$0.80000 * 72.00 =$	\$ 57.60
		Total de Cargos Fijos	\$ 192.30
Consumos			
COMBUSTIBLES	$Co = Gh * Pc =$	$13.00000 * 20.15 =$	\$ 261.95
LUBRICANTES	$Lb = Ah * Pac =$	$0.08500 * 88.21 =$	\$ 7.33
		Total de Consumos	\$ 269.28
Operación			
	$Sn =$ Salario tabulado = \$214.29		
	$Fsr =$ Factor de salario real = 1.70019		
	$Sr =$ Salario real de operación = $Sn * Fsr =$ \$364.33		
	$Ht =$ Horas efectivas por turno de trabajo = 8.00		
OPER01	$Po = Sr / Ht =$	$364.33 / 8.00 =$	\$ 45.54
		Total de Operación	\$ 45.54
		Costo Horario	\$ 507.12

Costo Horario de Equipo

Descripción

Clave: VIBRO
VIBROCOMPACTADOR INGERSOLL RANDSD 100DTF

Unidad : hora
Fecha : 05/May/2020

Datos Generales

Vad = Valor de adquisición =	1500000.00 \$	Pnom = Potencia nominal =	107.00000 hp
Pn = Valor de llantas =	60000.00 \$	Tipo de combustible:	Diesel
Pa = Valor de piezas especiales =	0.00 \$	Pc = Precio del combustible =	20.15 \$ litro
Vm = Valor neto = Vad-Pn-Pa =	1440000.00 \$		
r = Factor de rescate =	0.20000		
Vr = Valor de rescate = Vm*r =	288000.00 \$		
i = Tasa de interés =	16.59 % anual		
s = Prima de seguros =	3.00 % anual	Pac = Precio del aceite =	88.21 \$ litro
Ko = Factor de mantenimiento =	1.00000	Vn = Vida económica de llantas =	3060.00 hrs
Ve = Vida económica =	8760.00 hrs		
Va = Vida económica de piezas especiales =	0.00 hrs	Gh = Cantidad de combustible =	11.00000 lts/hr
Hea = Tiempo trabajado por año =	1752.00 hrs	Ah = Cantidad de aceite =	0.11000 lts/hr
K = Coeficiente de almacenaje =	0.20000		

Clave	Fórmula	Operaciones	Total
Cargos Fijos			
Depreciación:	$D = (Vm - Vr) / Ve =$	$(1440000.00 - 288000.00) / 8760.00 =$	\$ 131.51
Inversión:	$Im = [(Vm + Vr) / 2Hea]^i =$	$[(1440000.00 + 288000.00) / 2 * 1752.00]^{0.165900} =$	\$ 81.81
Seguros:	$Sm = [(Vm + Vr) / 2Hea]^s =$	$[(1440000.00 + 288000.00) / 2 * 1752.00]^{0.030000} =$	\$ 14.79
Mantenimiento:	$Mn = Ko * D =$	$1.00000 * 131.51 =$	\$ 131.51
Almacenamiento:	$A = K * D =$	$0.20000 * 131.51 =$	\$ 26.30
Total de Cargos Fijos			\$ 385.92
Consumos			
COMBUSTIBLES	$Co = Gh * Pc =$	$11.00000 * 20.15 =$	\$ 221.65
LUBRICANTES	$Lb = Ah * Pac =$	$0.11000 * 88.21 =$	\$ 9.48
LLANTAS	$N = Pn / Vn =$	$60000.00 / 3060.00 =$	\$ 19.50
Total de Consumos			\$ 250.63
Operación			
Sn = Salario tabulado = \$400.00			
Fsr = Factor de salario real = 1.67212			
Sr = Salario real de operación = Sn * Fsr = \$668.85			
Ht = Horas efectivas por turno de trabajo = 8.00			
OPEVIBRO	$Po = Sr / Ht =$	$668.85 / 8.00 =$	\$ 83.61
Total de Operación			\$ 83.61
Costo Horario			\$ 720.16

A2-Reporte técnico



MAESTRÍA EN INGENIERIA DE LA CONSTRUCCIÓN

CLAVE:

RTMIC001

Título:	Reporte Técnico para la utilización de Ceniza Volcánica como estabilizador de arcillas
---------	---

Revisión: 1

Nº Paginas: 7

Fecha: 16/11/2020

1	<i>Primera edición de este documento</i>	16/11/20
Edición	Concepto	Fecha
REALIZÓ: Ing. Luis Guillermo Ramírez Borbón	REVISÓ Dra. Susana Paola Arredondo Rea	APROBÓ Presidente Comité Evaluador

MAESTRÍA EN INGENIERIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Clave: Nº Edición: Revisión:	RTMIC001 1 000	TÍTULO: Reporte Técnico para la utilización de Ceniza Volcánica como estabilizador de arcillas	Página 2 de 9
------------------------------------	----------------------	--	---------------

CONTENIDO

1	PROPÓSITO	3
2	ALCANCE.....	3
3	POLÍTICA.....	3
4	DEFINICIONES Y ABREVIATURAS.....	3
4.1	Definiciones.....	3
4.2	Abreviaturas.....	4
5	ACTIVIDADES	5
6	RECOMENDACIONES	6

MAESTRÍA EN INGENIERIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Clave: Nº Edición: Revisión:	RTMIC001 1 000	TÍTULO: Reporte Técnico para la utilización de Ceniza Volcánica como estabilizador de arcillas	Página 3 de 9
------------------------------------	----------------------	--	---------------

1 PROPÓSITO

Establecer la metodología para utilizar ceniza volcánica con adiciones mínimas de cal como material estabilizante de arcillas, para que la arcilla estabilizada cumpla con los criterios establecidos en la norma N-CMT-1-01/16.

2 ALCANCE

La metodología que se presentará es de importante relevancia para constructores dedicados al movimiento de tierras e investigadores de los materiales cementantes suplementarios.

3 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

3.1 Definiciones

ARCILLA	Arcilla es una asociación de minerales arcillosos (silicatos complejos hidratados de aluminio) de pequeño tamaño de partícula originada por la alteración de rocas ígneas (granitos, riolitas, dioritas, basaltos), que bajo condiciones de presión, temperatura, acidez, desilicifican a minerales arcillosos sílice libre y alcalies.
CENIZA VOLCÁNICA	La ceniza volcánica producida por la actividad volcánica consiste en rocas, minerales y fragmentos de vidrio volcánico, tienen una reacción puzolánica debido a la presencia de vidrio volcánico formado por el rápido enfriamiento de la ceniza producida por la erupción volcánica.

MAESTRÍA EN INGENIERIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Clave: Nº Edición: Revisión:	RTMIC001 1 000	TÍTULO: Reporte Técnico para la utilización de Ceniza Volcánica como estabilizador de arcillas	Página 4 de 9
------------------------------------	----------------------	--	---------------

CAL	Cuerpo sólido, blanco, amorfo, pulverulento, soluble parcialmente en el agua, se produce mediante la quema de piedra caliza.
ESTABILIZACIÓN DE SUELO	Serie de procesos mecánicos, físicos, físico-químicos y químicos que transforman las propiedades de los suelos que interesan en las aplicaciones de la ingeniería, obteniendo un material apto para su utilización, que busca mejorar las propiedades tales como: resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, estabilidad volumétrica, compresibilidad, trabajabilidad.

3.2 Abreviaturas

CV	Ceniza Volcánica
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes

4 REFERENCIAS

<i>No.</i>	<i>Descripción</i>
1	The influence of using quicklime and volcanic ash as stabilizing materials in clay viewed from CBR value
2	Effect of Volcanic Ash Utilization as Substitution Material for Soil Stabilization in View Point of Geo-Environment
3	Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite
4	Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil
5	Clay Stabilization Using the Ash of Mount Sinabung in Terms of the Value of California Bearing Ratio (CBR)
6	Effect of Kelud Volcanic Ash Utilization on The Physical Properties as Stabilizer Material for Soil Stabilization
7	Study of stabilized soil clay soil characteristics using vulcanic ash and

MAESTRÍA EN INGENIERIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Clave: Nº Edición: Revisión:	RTMIC001 1 000	TÍTULO: Reporte Técnico para la utilización de Ceniza Volcánica como estabilizador de arcillas	Página 5 de 9
------------------------------------	----------------------	--	---------------

	tailing as subgrade layers
8	Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans
9	Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes

MAESTRÍA EN INGENIERIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Clave: Nº Edición: Revisión:	RTMIC001 1 000	TÍTULO: Reporte Técnico para la utilización de Ceniza Volcánica como estabilizador de arcillas	Página 6 de 9
------------------------------------	----------------------	--	---------------

5 ACTIVIDADES

5.1 Actividades

A continuación se enlistan las actividades que se deberán ejecutar para la correcta utilización de la ceniza volcánica como estabilizador de suelos, siendo la ceniza volcánica una ayuda para disminuir el consumo de cal en el proceso de estabilización.

5.1.1 Obtención de materiales

Con base a los manuales M-MMP-1-01/03 de Muestreo de materiales para Terracerías se deberá obtener arcilla y ceniza volcánica.

5.1.2 Caracterización de materiales

Es importante caracterizar los materiales para poder obtener un punto de partida en el proceso de estabilización, basados en el manual M-MMP-1-07/07 Límites de Consistencia es necesario caracterizar la arcilla conociendo sus límites de consistencia, así mismo con el manual M-MMP-1-11/08 podemos obtener el Valor de Soporte de California y el valor de la Expansión.

Para la ceniza volcánica se deberá las pruebas de fluorescencia de rayos X para conocer su composición química cuyo método se establece en la norma NMX-E-572-02-2005, granulometría y densidad de sólidos antes de la molienda.

MAESTRÍA EN INGENIERIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Clave: Nº Edición: Revisión:	RTMIC001 1 000	TÍTULO: Reporte Técnico para la utilización de Ceniza Volcánica como estabilizador de arcillas	Página 7 de 9
------------------------------------	----------------------	--	---------------

5.1.3 Prueba de Eades & Grim.

Esta prueba normada por la ASTM-D-6276 se basa en el concepto de que cuando se agrega un compuesto cáustico a base de calcio al suelo arcilloso, se produce una reacción que se basa en la solubilidad suelo-sílice y suelo-alúmina en un pH alto.

En esta prueba se tiene que tamizar la arcilla por la malla No. 40 e ir colocando diferentes cantidades de cal a varias muestras de arcilla, a las cuales se les medirá el pH hasta llegar a un valor de 12.4, la cal necesaria para llegar a dicho pH se le llamará el contenido óptimo de cal.

5.1.4 Tamizar la CV por la malla No. 200

En base a la bibliografía revisada, es necesario moler y tamizar la ceniza por la malla 200 puesto que el proceso de reacción de la CV con la arcilla es puzolánico, al molerla se hace más efectivo dicho proceso.

5.1.5 Realización de mezclas

El valor del contenido óptimo de cal se reducirá a la mitad y se agregará ceniza volcánica en intervalos de 10 en 10 % en base al peso de la arcilla, hasta llegar al 40% del peso de la arcilla.

MAESTRÍA EN INGENIERIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Clave: Nº Edición: Revisión:	RTMIC001 1 000	TÍTULO: Reporte Técnico para la utilización de Ceniza Volcánica como estabilizador de arcillas	Página 8 de 9
------------------------------------	----------------------	--	---------------

5.1.6 Caracterización de cada mezcla

Se debe de caracterizar cada mezcla con los manuales ya mencionados anteriormente y compararlo con los parámetros que establece la norma N-CMT-1-01/16. La mezcla óptima será la que cumpla con los parámetros establecidos en la norma con el menor material utilizado.

5.1.7 Toma de acciones

Si las metas no se cumplen, entonces habrá que fundamentar las causas y tomar acciones de tipo preventivo si se puede mejorar en el corto y el mediano plazo o del tipo correctivo si se requiere un cambio a fondo para la solución del problema. Una vez documentadas las causas y buscado las soluciones necesarias habrá que darles un seguimiento documental hasta la conformidad con lo establecido en las metas del programa y evaluar de nuevo los indicadores de calidad que no cumplieron e iniciar el proceso si siguen siendo producto no conforme.

MAESTRÍA EN INGENIERIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Clave: Nº Edición: Revisión:	RTMIC001 1 000	TÍTULO: Reporte Técnico para la utilización de Ceniza Volcánica como estabilizador de arcillas	Página 9 de 9
------------------------------------	----------------------	--	---------------

6 RECOMENDACIONES

Para cada tipo de suelo se deberá realizar el mismo procedimiento anteriormente mencionado.

Al hacer los ensayos poner especial atención en el tiempo de curado ya que es importante dejar que se produzcan las reacciones puzolánicas y así conocer el verdadero potencial del suelo.

