



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría En ingeniería de vías terrestre, transporte y logística

MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL TEPETATE
UTILIZANDO CAL Y FIBRAS SINTÉTICAS, PARA USO EN PAVIMENTOS.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en ingeniería de vías terrestres, transporte y logística

Presenta:

Ing. Cirilo Antonio Arjona Puentes

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

SINODALES

Dra. Teresa López Lara
Presidente

Firma

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Secretario

Firma

Dr. Saúl Obregón Biosca
Vocal

Firma

Dr. Eduardo Betanzo Quezada
Suplente

Firma

Dr. Alfredo Pérez Garcia
Suplente

Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
12 de noviembre del 2015

RESUMEN

El tepetate es un material abundante que ocupa aproximadamente un tercio de la superficie de nuestro país, su principal deficiencia radica en sus características mecánicas limitadas, ya que su resistencia como material compactado es muy baja, del orden de 0.08 Mpa (López Lara et al. 2013), así mismo su resistencia a la tensión es mínima, características que hacen de este un suelo subestimado al ser utilizado únicamente como material de relleno en la mayoría de las construcciones. Es a partir de esta problemática donde surge la relevancia de esta investigación, que persigue el propósito de convertir un suelo inestable y de bajas propiedades mecánicas, en un suelo compuesto con óptimas características de calidad y aprovechable principalmente en capas del pavimento que demandan mayor capacidad de sus materiales. Dentro de los métodos más utilizados desde tiempos remotos hasta la actualidad, el cual mejora las propiedades de los materiales, es la estabilización química de suelos mediante cal. Así mismo un método adicional que permite dar una mejor solución, es el uso de fibras en suelos para apoyo en tensión, las fibras usualmente se utilizan para mejorar la resistencia del suelo, y reducir la retracción (Puppala y Musenda, 2000). A partir de la acción conjunta de estas metodologías de mejoramiento de suelos, que corresponden a un tratamiento químico con cal hidratada y un reforzamiento con fibras sintéticas, se busca la obtención de mejores propiedades a compresión y tensión respectivamente, en el suelo denominado tepetate, cuya caracterización resulto en una matriz de gravas y arenas con limos. Del análisis de los resultados en pruebas mecánicas, se verifica la influencia de la inclusión de estos aditivos en nuestro tepetate, en el cual se obtiene un incremento respecto al valor inicial del suelo en estado natural, del orden de 23 veces para resistencia a compresión y 14 veces la resistencia a tensión, así como un aumento de la capacidad portante de hasta 3 veces más de su valor inicial, encontrando que la dosificación óptima de nuestro suelo compuesto es de tepetate con 10% de Cal y 8 % de Fibras.

(Palabras clave: Tepetate, Mejoramiento de suelo, Cal, Fibras sintéticas)

SUMMARY

Tepetate is a wealth of material which occupies about a third of the total surface area of our country, its main weakness lies in its mechanical characteristics low, such as resistance compacted material is very low, the order of 0.08 Mpa (López Lara et al. 2013), likewise, its tensile strength is minimal, features that make this a ground underestimated to be used only as filler material in most of the constructions. It is from this problem arises where the relevance of this research, which has as its aim to convert an unstable soil and low mechanical properties, in a soil composed with the best quality characteristics and exploitable mainly in layers of the pavement which demand higher capacity of their materials. Within the methods most commonly used from ancient times to the present, which enhances the properties of materials, is the chemical stabilization of soils by lime. Well same an additional method that allows you to give a better solution, is the use of fibers in soils to support in voltage, the fibers are usually used to improve the resistance of the soil, and reduce the retraction (Puppala and Musenda, 2000). From the joint action of these methodologies to improve soil, which correspond to a chemical treatment with hydrated lime, and a strengthening with synthetic fibers, is looking for obtaining best properties to compression and tension respectively, in the ground called tepetate, whose characterization resulted in an array of gravels and sands with silt. Analysis of the results in mechanical testing, checked the influence of the inclusion of these additives in our tepetate, which gets an increase with respect to the initial value of the soil in its natural state, the order of 23 times for resistance to compression and 14 times the resistance to tension, as well as an increase in the load-bearing capacity of up to 3 times more than its initial value, finding that the optimal dosage of our soil compound is tepetate with 10% of lime and 8% of fibers.

(Key words: tepetate, soil improvement, lime, synthetic fibers)

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por ser siempre mi fuente de inspiración y motivo para buscar siempre ser mejor.

A mi Directora de Tesis, la Dra. Teresa López Lara por su apoyo incondicional en el desarrollo de mi investigación.

A mis Sinodales, por sus acertadas aportaciones al desarrollo de esta investigación

A mis profesores del cuerpo académico de la Maestría en Vías Terrestres, Transporte y Logística, por todo el conocimiento brindado dentro y fuera del aula.

Al M.C. Guillermo Vázquez Sánchez del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM, por su apoyo en la realización del ensaye de tensión directa en las fibras estudiadas.

A la M. C Marina Vega, por su apoyo en la realización del análisis de difracción de rayos X.

A la Dra. Dora Celia Carreón Freyre, investigadora titular del laboratorio de mecánica de geosistemas, en el centro de geociencias, UNAM, por su apoyo en la preparación de muestras para análisis mineralógico del suelo.

A mis compañeros de Maestría (Faby, Moni, Checho, Gera, Euginy, Ruben, Heri) por la oportunidad de compartir estos dos años de excelentes momentos a su lado.

A mis colegas estudiantes de otras maestrías de la facultad de ingeniería, que me brindaron su sincera amistad y grandes momentos de alegría.

Al personal del Laboratorio de Mecánica de Suelos (Lupillo, Hugo, Gabriel, Jonatán), por su gran apoyo en todo el desarrollo de mi experimentación

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca de manutención en estos dos años.

DEDICATORIAS

Se dice que diseñar un pavimento es un arte; el arte de utilizar materiales que no conocemos completamente, en formas que no podemos analizar con precisión, para que soporten cargas que no sabemos predecir, de tal forma que nadie sospeche nuestra ignorancia.

“De esa estructura compleja a la que llamamos pavimento, que construimos muchos en muchas variedades, con distintos materiales, para muy diferentes usos, en muy diferentes terrenos y que usamos en todo momento, a fondo, lo ignoramos todo”

Maestro Alfonso Ríco en la Decimocuarta Conferencia Nabor Carrillo.

Existe una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica; LA VOLUNTAD.

A mi padres y familia, el motor que me impulsa a ser mejor día con día.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2	ANTECEDENTES	3
1.3	HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	6
2.	ORIGEN, USOS Y MEJORAMIENTO DEL TEPETATE PARA USO EN PAVIMENTOS.	7
2.1	ORIGEN DEL TEPETATE	7
2.1.1	<i>De origen Geológico</i>	7
2.1.2	<i>De Origen Diagenético - Pedológico</i>	9
2.1.3	<i>Por degradación física del suelo</i>	9
2.2	TEPETATE EN LA CONSTRUCCIÓN	11
2.3	MEJORAMIENTO DE SUELOS	14
2.3.1	<i>Generalidades</i>	14
2.3.2	<i>Métodos para el mejoramiento de suelos</i>	14
2.4	TRATAMIENTO QUÍMICO CON CAL	21
2.4.1	<i>Definición de cal</i>	21
2.4.2	<i>Tipos de cal</i>	22
2.4.3	<i>Aplicaciones de la cal</i>	24
2.4.4	<i>Estabilización de suelos con cal</i>	26
2.4.5	<i>Interacción Suelo-Cal</i>	28
2.5	REFUERZO CON FIBRAS	31
2.5.1	<i>Fibras de refuerzo</i>	31
2.5.2	<i>Tipos de fibra de refuerzo</i>	32
2.5.3	<i>Suelos Reforzados con fibras</i>	38
2.5.4	<i>Interacción Suelo-Fibra</i>	44
2.6	DISEÑO DE PAVIMENTOS	48
2.6.1	<i>Metodología Empírica (UNAM-DISPAV)</i>	51
2.6.2	<i>Metodología Empírico-Mecanicista (IMT-PAVE)</i>	53
2.6.3	<i>Módulo de Resiliencia</i>	57
3.	METODOLOGIA	62
3.1	BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE BANCO DE MATERIAL	63
3.2	MUESTREO Y PROCEDIMIENTOS PRELIMINARES	64
3.2.1	<i>Muestreo</i>	64
3.2.2	<i>Procedimientos Preliminares</i>	64

3.3	CARACTERIZACIÓN DEL SUELO	66
3.4	CLASIFICACIÓN DEL SUELO	68
3.5	EXPERIMENTACIÓN TEPETATE-CAL	68
3.6	EXPERIMENTACIÓN TEPETATE-FIBRAS	69
3.7	EXPERIMENTACIÓN TEPETATE-CAL-FIBRAS	70
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	71
4.1	SELECCIÓN DE BANCO DE MATERIAL Y MUESTREO	71
4.2	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL TEPETATE NATURAL EN ESTUDIO	72
4.3	PROPIEDADES OBTENIDAS DE MEZCLA TEPETATE-CAL	76
4.3.1	<i>Proctor Modificada.....</i>	<i>77</i>
4.3.2	<i>Compresión no confinada.....</i>	<i>79</i>
4.3.3	<i>Ensaye de Tensión Indirecta</i>	<i>80</i>
4.3.4	<i>Valor Relativo de Soporte</i>	<i>81</i>
4.3.5	<i>Resumen de resultados de ensayos mecánicos</i>	<i>82</i>
4.4	PROPIEDADES OBTENIDAS DE MEZCLA TEPETATE-FIBRAS	84
4.4.1	<i>Proctor Modificada.....</i>	<i>86</i>
4.4.2	<i>Propiedades mecánicas de la mezcla de tepetate-fibras</i>	<i>87</i>
4.5	PROPIEDADES OBTENIDAS DE MEZCLA TEPETATE-CAL-FIBRAS.....	90
4.5.1	<i>Compactación Proctor Modificada.....</i>	<i>91</i>
4.5.2	<i>Propiedades mecánicas de la mezcla de Tepetate-Cal-Fibras.....</i>	<i>91</i>
4.6	EJEMPLO DE DISEÑO DE PAVIMENTO CON TEPETATE MEJORADO.....	98
4.6.1	<i>Descripción</i>	<i>98</i>
4.6.2	<i>Diseño UNAM-DISPAV</i>	<i>101</i>
4.6.3	<i>Diseño IMT-PAVE.....</i>	<i>102</i>
4.6.4	<i>Análisis del beneficio económico.....</i>	<i>105</i>
5.	CONCLUSIONES	107
6.	REFERENCIAS.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

1. 1 LOS TEPETATES EN AMÉRICA LATINA.	3
1. 2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS TEPETATES EN EL TERRITORIO NACIONAL.	4
2. 1 MICROFOTOGRAFÍAS DEL GRADO DE COMPACTACIÓN Y CEMENTACIÓN DEL TEPETATE.	10
2. 2 ZONAS GRANULOMÉTRICAS RECOMENDABLES DE LOS MATERIALES PARA SUBBASES DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.	13
2. 3 UTILIZACIÓN DEL TEPETATE EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN 13	13
2. 4 CONCEPTO DE CONSOLIDACIÓN POR VACÍO.	16
2. 5 CLASIFICACIÓN DE MÉTODO DE INYECCIÓN POR TIPO DE SUELO.	18
2. 6 CICLO DE LA CAL.....	21
2. 7 PIEDRA CALIZA, CARBONATO DE CALCIO (CAO3).	22
2. 8 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LA CAL 22	22
2. 9 ALGUNAS APLICACIONES DE CAL HIDRATADA EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN 25	25
2. 10 CAPA ESTABILIZADA CON CAL SOPORTA LA EROSIÓN..... 26	26
2. 11 MÉTODO DE ÉADES Y GRIM BASADO EN EL PH PARA OBTENER EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CAL HIDRATADA. 30	30
2. 12 CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS 32	32
2. 13 TIPOS DE FIBRAS NATURALES PARA REFUERZO 35	35
2. 14 TIPO DE FIBRAS ARTIFICIALES MÁS UTILIZADAS 37	37
2. 15 TERRAPLÉN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO EN EL PROYECTO “PRESIDENT GEORGE BUSH TURNPIKE” 44	44
2. 16 DIAGRAMA DE INTERACCIONES MECÁNICAS ENTRE PARTÍCULAS DE SUELO Y DE FIBRAS..... 45	45
2. 17 MICROFOTOGRAFÍA SEM, INTERFAZ SUELO-FIBRA DESPUÉS DE LA COMPACTACIÓN 45	45
2. 18 MICROFOTOGRAFÍA SEM, INTERFAZ SUELO-FIBRA DESPUÉS DE LA PRUEBA DE EXTRACCIÓN 46	46
2. 19 DIAGRAMA DE LA CONDICIÓN DE CONTACTO ENTRE LAS PARTÍCULAS DE SUELO DURO Y LA SUPERFICIE DE LA FIBRA. 47	47
2. 20 FACTORES QUE AFECTAN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS..... 48	48
2. 21 ESQUEMA PARA ILUSTRAR DONDE ESTAMOS EN CUANTO A MÉTODOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE PAVIMENTOS. 49	49
2. 22 TRAMOS DE PRUEBA, INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM, 1962 51	51
2. 23 SOFTWARE DISPAV-5 PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS CON LA METODOLOGÍA UNAM 52	52
2. 24 PANTALLA DE BIENVENIDA DEL IMT-PAVE 1.2 53	53
2. 25 ESQUEMA DEL PROCESO DE TRANSICIÓN ENTRE EL ESPECTRO DE CARGA –ESPECTRO DE DAÑO. 54	54
2. 26 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL PARA EL CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE DAÑO..... 55	55
2. 27 TIPOS DE DETERIORO COMUNES EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS 56	56
2. 28 CICLOS DE CARGA PARA LLEGAR AL MÓDULO RESILIENTE..... 58	58
2. 29 CORRELACIONES CBR – MR..... 61	61

3. 1 DIAGRAMA DESCRIPTIVO DE LA METODOLOGÍA	62
3. 2 UBICACIÓN DE ALGUNOS BANCOS DE TEPETATE EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO	63
4. 1 LOCALIZACIÓN DEL BANCO DE MATERIAL TEPETATE CONOCIDO COMO “EL ROSARIO”	71
4. 2 MUESTREO DE TEPETATE EN EL BANCO DE MATERIAL	72
4. 3 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL TEPETATE.....	72
4. 4 GRANULOMETRÍA DEL TEPETATE ESTUDIADO.....	74
4. 5 DIFRACTOGRAMA RESULTANTE DEL ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX). A) BANCO DE MATERIAL EL MARQUES, B) BANCO DE MATERIAL MOMPANI UTILIZADO EN LÓPEZ LARA, 2012	75
4. 6 MUESTRA DE CAL HIDRATADA PARA EXPERIMENTACIÓN.....	76
4. 7 RESULTADOS DE ENSAYES DE COMPACTACIÓN PARA MEZCLA DE TEPETATE-CAL	78
4. 8 PROCEDIMIENTO DE ENSAYE PROCTOR MODIFICADA CON TEPETATE-CAL.....	78
4. 9 PROCEDIMIENTO DE ENSAYE DE COMPRESIÓN SIMPLE DE MEZCLA TEPETATE-CAL.....	79
4. 10 PROCEDIMIENTO DE ENSAYE DE TENSIÓN INDIRECTA EN MEZCLA TEPETATE-CAL	80
4. 11 PROCEDIMIENTO DE ENSAYE VRS PARA MEZCLA DE TEPETATE-CAL	81
4. 12 RESUMEN DE ENSAYES DE COMPRESIÓN Y TENSIÓN	82
4. 13 RESUMEN DE ENSAYES DE CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO	83
4. 14 FIBRAS METÁLICAS DE ACERO “REBABAS”	84
4. 15 CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN RESULTANTE DE ENSAYE DE TENSIÓN DIRECTA	85
4. 16 RESULTADOS DE ENSAYE DE COMPACTACIÓN PARA MEZCLA DE TEPETATE-FIBRAS	86
4. 17 PROCEDIMIENTO DE ENSAYE PROCTOR MODIFICADA PARA MEZCLA DE TEPETATE-FIBRA	87
4. 18 ENSAYES REALIZADOS PARA LA EXPERIMENTACIÓN TEPETATE-FIBRAS.	87
4. 19 RESUMEN DE ENSAYES DE COMPRESIÓN Y TENSIÓN, MEZCLA TEPETATE-FIBRA.....	89
4. 20 RESUMEN DE ENSAYES DE CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO, MEZCLA TEPETATE-FIBRAS	89
4. 21 ENSAYES REALIZADOS PARA LA EXPERIMENTACIÓN CON TEPETATE-CAL-FIBRAS.....	90
4. 22 RESULTADOS DE ENSAYE DE COMPACTACIÓN PARA MEZCLA DE TEPETATE-CAL-FIBRAS	91
4. 23 RESUMEN DE ENSAYES DE COMPRESIÓN Y TENSIÓN, MEZCLA TEPETATE-CAL-FIBRA	93
4. 24 RESUMEN DE ENSAYES DE CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO, MEZCLA TEPETATE-CAL-FIBRAS	94
4. 25 PREPARACIÓN DE VIGAS PARA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	95
4. 26 ENSAYE DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN	95
4. 27 COMPARATIVA DE FLEXIÓN Y TENSIÓN PARA LA DOSIFICACIÓN OPTIMA	96
4. 28 RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYE DE COMPRESIÓN NO CONFINADA.....	96
4. 29 RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYE DE TENSIÓN INDIRECTA.....	97
4. 30 RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYE DE VRS.....	97

4. 31 TRAMO CARRETERO GUADALAJARA TEPIC, MEX-015	98
4. 32 DISEÑOS CON SOFTWARE DISPAV, A) DISEÑO CON TEPETATE NATURAL B) DISEÑO CON TEPETATE MEJORADO.	101
4. 33 DATOS DE TRÁNSITO, IMT-PAVE 1.2	102
4. 34 ESPECTRO DE CARGA PARA UNA EVALUACIÓN DE NIVEL DE ALTA SOBRECARGA	103
4. 35 ANÁLISIS ESPECTRAL CON EL USO DE TEPETATE NATURAL	104
4. 36 ANÁLISIS ESPECTRAL CON EL USO DE TEPETATE MEJORADO	104
4. 37 SECCIÓN DE PAVIMENTO RESULTANTE A) TEPETATE NATURAL B) TEPETATE MEJORADO	105

INDICE DE TABLAS

2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DIAGNOSTICADAS EN LOS TEPETATES.....	8
2.2 REQUISITOS DE CALIDAD DE LOS MATERIALES PARA SUBBASES DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	11
2.3 ESPECIFICACIONES QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LA CAL HIDRATADA.....	27
2.4 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS FIBRAS.....	40
2.5 VALORES DE MÓDULO DE RESILIENCIA Y OTRAS CARACTERÍSTICAS.....	59
2.6 MÓDULOS RESILIENTES DE BASES, SUBBASES Y SUBRASANTES	60
2.7 VALOR RECOMENDADO DE K PARA DIFERENTES CANTIDADES DE EJES EQUIVALENTES.....	61
3.1 PRUEBAS DE LABORATORIO QUE SE EFECTÚAN A LOS SUELOS QUE SE EXTRAEN DE BANCOS, SEGÚN SU UTILIZACIÓN	66
4.1 COORDENADAS DE LA POLIGONAL QUE DELIMITA EL BANCO DE MATERIAL.....	71
4.2 RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL TEPETATE	73
4.3 RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS	73
4.4 CARACTERÍSTICAS DEL MÉTODO DE ENSAYE PROCTOR MODIFICADA	77
4.5 RESULTADOS COMPRESIÓN SIMPLE DE MEZCLA TEPETATE-CAL.....	79
4.6 RESULTADOS DE ENSAYES DE TENSIÓN INDIRECTA DE MEZCLA TEPETATE-CAL	80
4.7 PENETRACIÓN PARA ENSAYE VRS.....	81
4.8 CARGA UNITARIA PATRÓN	81
4.9 RESULTADOS DE VRS PARA MEZCLA DE TEPETATE-CAL.....	82
4. 10 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y DE TENSIÓN DE LA FIBRA METÁLICA “REBABA”	85
4.11 RESULTADOS DE ENSAYE A COMPRESIÓN SIMPLE DE LA MEZCLA TEPETATE-FIBRAS	88
4. 12 RESULTADOS DE ENSAYE A TENSIÓN INDIRECTA DE LA MEZCLA TEPETATE-FIBRAS.....	88
4. 13 RESULTADOS DE ENSAYE DE VRS DE LA MEZCLA TEPETATE-FIBRAS	88
4.14 RESULTADOS DE COMPRESIÓN SIMPLE DE LA MEZCLA FINAL TEPETATE-CAL-FIBRAS	92
4. 15 RESULTADOS DE TENSIÓN INDIRECTA DE LA MEZCLA FINAL TEPETATE-CAL-FIBRAS	92
4. 16 RESULTADOS DE VRS DE LA MEZCLA FINAL TEPETATE-CAL-FIBRAS	93
4.17 DATOS VIALES DE LA ESTACIÓN SAN CAYETANO EN LA RED GUADALAJARA-TEPIC	99
4.18 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO ASFALTICO.....	100
4. 19 CALCULO DEL COSTO TOTAL DE PAVIMENTO	106

1. INTRODUCCIÓN

La construcción dentro vías terrestres a base de materiales considerados como suelos, se considera la más importante dado su origen natural, economía, sustentabilidad, aunado a la gran diversidad de materiales existentes en cualquier región de nuestro país, mismos que son de enorme aprovechamiento en los procedimientos constructivos para las vías de comunicación terrestres. Sin embargo dicho aprovechamiento está limitado a las propiedades mecánicas del material en su forma natural, lo cual en ocasiones limita ser utilizado únicamente como material de relleno, un ejemplo de este tipo de materiales son los tepetates.

De acuerdo con López-Lara *et al.* (2013) el tepetate es un material de la tierra subestimado, vasto y económico utilizado únicamente en una forma compactada en rellenos de capas de baja resistencia de los pavimentos y las plataformas de los edificios.

La mejor solución para enfrentar suelos problemáticos será siempre la sustitución del material, sin embargo esta alternativa no siempre es posible, por lo cual se requiere aprovechar el suelo natural potencializando sus propiedades mediante un proceso de manipulación. Dentro de los métodos más utilizados desde tiempos remotos, está la estabilización química de suelos mediante cal, la cual mejora las propiedades del terreno. De acuerdo a López Lara *et al.* (2013) se ha concluido que el tepetate aumenta significativamente su resistencia mediante la adición de cal, inmediatamente después del tratamiento y con el tiempo. Un método novedoso es el uso de fibras en suelos para apoyo en tensión, mejorando la resistencia del suelo y reduciendo la retracción (Puppala y Musenda, 2000).

Con estas metodologías se buscará realizar un mejoramiento del tepetate, mezclando cal con fibras sintéticas en el suelo natural arenoso, que resultara en un método eficaz para obtener un suelo compuesto resistente y durable, utilizable en capas del pavimento y estructuras de tierra que requieren mejores propiedades mecánicas.

1.1 Descripción del problema

En la construcción de pavimentos y en general en la industria de la construcción, el principal problema surge a partir de encontrar un material que satisfaga adecuadamente varios aspectos: económicos, óptimas características geotécnicas, abundancia y facilidad de extracción, que coadyuven a su mejor aprovechamiento. Comprendiendo la importancia que tiene el suelo sometido a cargas ya que es en ellos o sobre ellos que se van a desplantar las estructuras, se requiere de estos fundamentalmente una resistencia mínima que no permita deformaciones excesivas, para altos niveles de carga que, particularmente en las carreteras mexicanas, se están presentando en la actualidad; pues, de acuerdo Mendoza y Gutiérrez (1994), las cargas están por encima de lo reglamentado.

Partiendo de estas necesidades, el suelo estudiado adquiere mayor relevancia, respaldado principalmente en su abundancia y economía, lo cual facilita su aprovechamiento. Sin embargo es un suelo subestimado al ser utilizado únicamente como material de relleno en la mayoría de las construcciones. En las carreteras se utiliza en la formación de terracerías, y en capas de baja resistencia que conforman la estructura del pavimento; empero, su aprovechamiento sigue siendo poco comparado con la gran potencialidad que tiene.

Por otra parte el tepetate tiene su principal dificultad en sus características mecánicas bajas, ya que su resistencia como material compactado es muy bajo, del orden de 0.08 Mpa (López Lara *et al.*, 2013). Así mismo su resistencia a la tensión es mínima, es común dejar de lado este parámetro en el análisis y diseño de estructuras de tierra, siendo que es muy útil conocer las propiedades de los suelos en tensión para comprender el agrietamiento en presas de tierra, terraplenes y en los pavimentos (Garnica, 2003). Derivado de lo anterior, se requiere encontrar mejores soluciones para aumentar las capacidades geotécnicas de compresión y tensión de este suelo, con métodos de mejoramiento que permitan obtener un suelo compuesto resistente.

1.2 Antecedentes

En los diversos trabajos sobre los tepetates de México, en los que se caracteriza principalmente sus propiedades físicas y químicas, se afirma que los tepetates exhiben una matriz compuesta de arena, limo y pequeños porcentajes de arcilla, no obstante en ocasiones pueden presentar altos contenidos de esta fracción (Miehlich, 1992; Peña y Zebrowsky, 1992; Etchevers *et al.*, 1992)

El tepetate se le conoce comúnmente en México como tobas pomosas o tobas calcáreas, que es un material muy empleado en la construcción por su economía y ligereza, que tiene características de cohesión muy corta, y un peso volumétrico del orden de 1200 kg/cm³ dependiendo de su composición. Son numerosos los depósitos de las tobas y se encuentran en terrenos inmediatos a los de origen volcánico en toda la superficie del país (Bárbara *et al.*, 1979).

Zebrowski (1992) menciona que este material considerado como un suelo volcánico endurecido, ha registrado su existencia en muchos países, principalmente de América Latina (Figura 1.1.), en Nicaragua se le conoce como talpetate, han sido llamados Hardpan, Duripan, Cangahua en Colombia y Ecuador, y denominados Cancagua, Moromoro, Tosca, Ñadis en Chile, así como Silcrete en Estados Unidos y en Japón como Kora y Masa.



Figura 1. 1 Los tepetates en américa latina.

Fuente: Peña *et al.* 1992

Los tepetates ocupan un área importante, con aproximadamente el 30 % de la superficie de México (figura 1.2), estos aparecen sobre la superficie o dentro del primer metro de profundidad efectiva del suelo (Flores *et al.*, 1991; Guerrero *et al.*, 1992). Zebrowski (1992) basado en cartografía de INEGI, estimó que los tepetates, particularmente los duripanes (SiO_2), abarcaban una superficie de 30 700 km². A lo que en otra valoración pero incluyendo también horizontes petrocalcicos y petrogipsicos, estimaron una cobertura de 140 000 km², (Guerrero *et al.*, 1992).

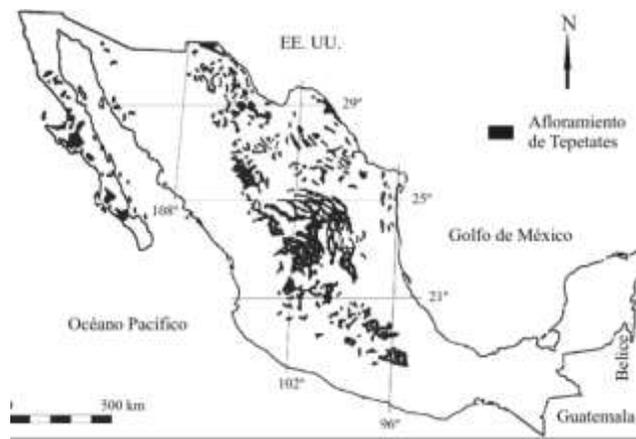


Figura 1. 2 Distribución espacial de los tepetates en el Territorio Nacional.

Fuente: Flores-Román *et al.* 1992

Miehlich (1984), Dubroeuq *et al.* (1989) y Nimlos (1990) resaltan la estrecha relación entre las distribución de los tepetates con la zona climática, mencionan que los tepetates aparecen bajo una pluviometría total anual inferior a 800-900 mm en el altiplano mexicano. Los tepetates ricos en carbonato de calcio se ubican en regiones con precipitación inferior a 650-700 mm. La interacción entre la humedad y la resistencia muestran un fenómeno común en todos los suelos, a mayor sequía de las muestras, mayor resistencia, (Nimlos 1989; Peña y Zebrowsky, 1992), Esto explica, porque los horizontes de tepetate son más resistentes si se exponen a la intemperie que cuando forman parte de un perfil como lo señala (Miehlich, 1992).

En la Región Central de México, principalmente en Querétaro y las regiones circundantes, el uso del tepetate está enfocado principalmente como material de sustitución de suelos problemáticos, es decir, cuando el suelo *in situ* no satisface la calidad necesaria para la ejecución de cualquier obra civil, como es el caso de los suelos expansivos que en presencia de cambios de humedad presentan alteraciones volumétricas (López-Lara *et al.*, 2005; López-Lara *et al.*, 2006).

Ante las dificultades que ocasiona un terreno de baja calidad, desde la antigüedad se ha buscado métodos para mejorar los terrenos existentes. La estabilización química con cal ha sido usada por muchos años mejorando las propiedades del terreno, pues disminuye la plasticidad de suelos arcillosos y es muy económica (Sampedro, 2005).

La cal ha sido desde tiempos remotos el principal ligante de la construcción en morteros, revestimientos y pinturas. Es responsable de la solidez de los edificios antiguos y medievales, también contribuyendo en las obras de arte que los decoran, como los frescos y estucos (Arredondo, 1980).

Las fibras naturales han sido utilizadas desde la antigüedad para la mejora de las propiedades de los materiales de construcción. En los últimos años se empezó a emplear fibras artificiales producto de excedente en procesos industriales, que son aprovechables en procesos de mejora de materiales, entre ellos los suelos (Fernández, 2006). Estos elementos mejoran principalmente la resistencia del suelo, así como reducir la contracción (Puppala y Musenda, 2000). Siendo elementos tensores, aumentan la resistencia a la tensión y las propiedades de compresión no confinada de suelos cohesivos. Mediante la orientación aleatoria de las fibras y su presencia del plano de corte proporcionara una significativa resistencia al corte por cargas axiales. En la construcción de pavimentos, el refuerzo con fibra, se puede utilizar para una amplia variedad de suelos, que van desde la arena a las arcillas de alta plasticidad (Lindh y Eriksson, 1990).

1.3 Hipótesis y Objetivos

Hipótesis:

El uso de cal mejora la resistencia a la compresión y las fibras sintéticas aumentan la resistencia a la tensión, en un tepetate natural, que generalmente se utiliza como relleno bajo la estructura de los pavimentos.

Objetivo General:

Obtener un suelo compuesto de tepetate-cal-fibras sustentable, con valores óptimos de resistencia a compresión y tensión, que resulte duradero, económico y aprovechable en las obras civiles y principalmente en las vías terrestres.

Objetivo Particular:

- Incrementar el aprovechamiento de este recurso natural sustentable
- Caracterizar el tepetate del banco elegido para la investigación.
- Verificar la influencia de la cal en el tepetate, específicamente en la variación a su resistencia a la compresión, así como el porcentaje óptimo.
- Verificar la influencia de las fibras sintéticas en el tepetate, específicamente en la variación a su resistencia a la tensión, y obtener la proporción óptima.
- Mejorar la compresión del tepetate natural utilizando cal y fibras
- Mejorar la tensión del tepetate natural utilizando cal y fibras
- Que sea considerado para la construcción de pavimentos, en capas que requieran mayores especificaciones, cumpliendo con los requisitos de calidad.

2. ORIGEN, USOS Y MEJORAMIENTO DEL TEPETATE PARA USO EN PAVIMENTOS.

2.1 Origen del tepetate

En el III Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos, realizado en Quito, Ecuador en el año de 1996, se definió al tepetate como un horizonte endurecido de origen volcánico, cuyo estructura está básicamente compuesta por materiales piroclásticos, ya sea en forma de caídas, flujos o bien como suelos volcánicos degradados. Si bien coloquialmente se le denomina tepetate a cualquier suelo volcánico endurecido en superficie (SVE), en términos científicos se considera tepetate a cualquier suelo de origen volcánico endurecido en el perfil edáfico (HVE).

La génesis de estos materiales es sin duda motivo de controversia, autores como Sauer (1965) y, Heine y Schönhals (1973) pensaban que los horizontes endurecidos se habían formado en los depósitos de loess de grandes glaciaciones, enfocados a la cangahua del Ecuador y tepetate de México principalmente. Actualmente la hipótesis fue descartada, ya que se ha comprobado que surgieron como producto de caídas piroclásticas con cierto grado de consolidación al ser depositados (Valdez, 1970; Vera y López, 1986 y 1992).

El conocimiento actual sobre la creación de los tepetates, de manera análoga a determinar su extensión territorial en el país, tienen un grado considerable de incertidumbre. Sin embargo, de acuerdo a los diversos estudios realizados sobre sus propiedades diagnósticas (tabla 2.1), es posible inferir que estos presentan tres probables orígenes (Gama-Castro *et al.*, 2007):

2.1.1 De origen Geológico

Los primeros estudios reportados en nuestro país, acerca del origen de los tepetates, arrojaron que estos se podían estructurar a partir de materiales piroclásticos con distintos grados de interperismo físico y químico, o incluso con lahares. Ejemplo de ello, son los tepetates del valle de México considerados como

tobas “pumosas” de la era Terciaria o Cenozoica en proceso de degradación (Salazar, 1938; Llerena, 1947 y García, 1961). Así mismo se encontró que los tepetates de la cuenca de México surgieron por el transporte aluvial de un fanolomerado que posteriormente se consolidó (Valdés, 1970). No obstante los resultados expuestos por dichos autores, no fueron suficientemente precisos y dejaron ambigüedades sobre el origen de los horizontes endurecidos, concluyendo que los tepetates pueden tener diversos orígenes (Rodríguez *et al.*, 1999).

Zebrowski (1992) plantea dos procesos geológicos que explican el endurecimiento de los horizontes: El primero se refiere al endurecimiento de los materiales volcánicos en el proceso de su depósito y posterior enfriamiento, como es el caso de los flujos piroclásticos. Un segundo proceso está enfocado a un fenómeno de compactación simple o hidroconsolidación de materiales volcánicos transportados por el agua, en los cuales existe un incremento en la densidad aparente del material, dureza y una disminución de la porosidad.

Tabla 2.1 Características físicas diagnosticadas en los tepetates

Tipo de Tepetate	Densidad Aparente (gr/cm ³)	Porosidad (%)	Conductividad Hidráulica (µm/s)	Retención de Humedad (%)	Erodabilidad (Factor K)	Arena	Clase Textural Porcentajes de Limo	Arcilla
Fragipan ⁺¹	1.70 Alta	21.0 Baja	4.5 Moderada	5.0 Muy baja	0.28 Moderada	80.13	9.23 Arena Migajosa	10.64
Fragipan ⁺¹	1.90 Alta	15.0 Baja	0.1 Baja	11.0 Baja	0.37 Alta	39.00	45.50 Migajon franco	15.50
Fragipan ⁺¹	1.96 Alta	13.0 Baja	0.07 Baja	12.0 Baja	0.33 Moderada	30.19	39.40 Migajón Arcilloso	30.41
Duripan ⁺²	1.80 Alta	19.0 Baja	<0.01 Muy baja	9.0 Muy Baja	0.45 Alta	9.00	65.00 Migajón limoso	26.00
Duripan ⁺²	1.92 Alta	20.0 Baja	0.04 Baja	10.5 Baja	0.33 Moderada	23.00	42.00 Migajón arcilloso	35.00
Duripan ⁺²	1.90 Alta	24.0 Baja	<0.01 Muy baja	10.2 Baja	0.40 Alta	22.00	60.00 Migajón limoso	18.00

*1Flores-Román *et al.*, 1992, *2Flores-Román 1996

2.1.2 De Origen Diagenético - Pedológico

Diferentes autores como: Nimlos (1990); Flores-Román *et al.* (1992); Miehlich (1992); Quantin (1992) y Bertaux y Quantin (1994) afirman que la formación de estos suelos es a partir de sedimentos sueltos que sufren tanto procesos diagenéticos (hidroconsolidación), como pedogenéticos (argilización; silicificación) que contribuyen a la compactación y/o cementación, se manifiesta que los tepetates se originan a partir de antiguos depósitos de cenizas volcánicas depositadas in situ o retrabajadas. Así mismo se consideró que los productos secundarios generados por el interperismo de la ceniza son principalmente sílice, alúmina y en menor grado arcillas. Hidalgo *et al.* (1992) consideraron que una parte del sílice, forma ópalo-A orgánico e inorgánico, que finalmente se incorpora a los minerales de arcilla. La degradación del suelo que ocasiona cambios en el régimen de humedad, propician un incremento en su compactación y endurecimiento de las arcillas ricas en ópalo-A, las cuales forman el tepetate.

2.1.3 Por degradación física del suelo

Según La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), las causas que provocan la degradación física del suelo y la posterior formación de tepetates, se divide en naturales y Antrópicas. En lo que se refiere a las naturales la constituyen principalmente el factor climático y el factor edáfico, es decir la escasez de lluvias e intensidad de las mismas, así como la modificación no antropogénica de las características de diagnósticas del suelo como puede ser la consolidación, compactación y cementación. Dentro del factor antrópico resultado propio de actividades antropogénicas y/o tecnogénicas, se encuentran causas como la deforestación por tala inmoderada, sobreexplotación de la vegetación, sobrepastoreo, así como actividades industriales y urbanizadoras. Este tipo de degradación se caracteriza por generar en el suelo diversos procesos, entre los que destacan en principio el deterioro o pérdida del horizonte superficial (horizonte A) por erosión, el afloramiento del horizonte subyacente expuesto a

reiterado procesos de humedecimiento y secado que provocan su consolidación y compactación, una disminución de su porosidad e incremento de su densidad y dureza, debido a la compactación (FAO-PNUMA ,1980).

En estas condiciones, la estructura del horizonte compactado, puede ser luego cementada por la acción de diferentes lixiviados principalmente sílice libre (SiO₂). A lo que cabe mencionar que son pocos los trabajos en los que se evidencia claramente la presencia de este tipo de sílice, con excepción a los realizados por (Poetsch, 2004)

Resulta posible inferir que independientemente de su génesis, los tepetates siempre presentan, dentro de un rango de oscilación, propiedades físicas, mecánicas y químicas que le son comunes entre sí. Destaca su Compactación o cementación, que se reflejan en densidades aparentes altas (1.7-1.9 g/cm), una porosidad baja de 13 a 24% (figura 2.1), así como conductividades hidráulicas y retención de humedad bajas (Etchevers *et al.*, 1992; Gutiérrez-Castorena y Ortíz-Solorio, 1992; Miehlisch, 1992; Peña y Zebrowski, 1992; Peña *et al.*, 1992).

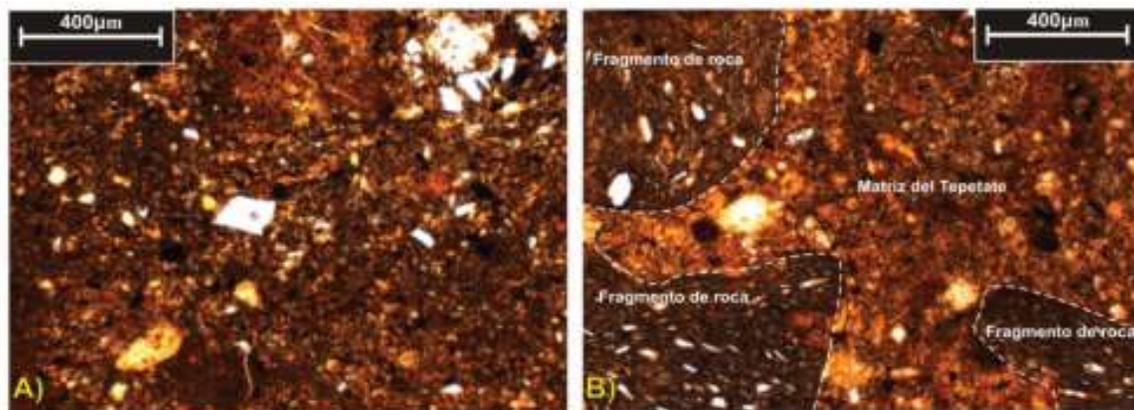


Figura 2. 1 Microfotografías del grado de compactación y cementación del tepetate.

a) Detalle de la matriz de un tepetate, compuesta principalmente por fracciones de limo, arcilla y en pequeñas cantidades proporciones de arena, con una baja porosidad. b) Matriz de un tepetate, compuesta por materiales finos de limo y arcilla, que mantienen cementados a fragmentos de rocas volcánicas. Fotografías tomadas con microscopio petrográfico, luz natural.

Fuente: Gama-Castro *et al.* 2007

2.2 Tepetate en la construcción

El tepetate como material de construcción ha desempeñado una papel muy importante en el desarrollo de México, prueba de esto son las plataformas de ruinas y muros arqueológicos hecho de este material (Williams, 1972 y Healan, 1989).

Son diversos los usos encontrados para la utilización de tepetate en las obras civiles, entre las que predominan su utilización como material de relleno, ya sea en entresijos, baños o plataformas de cimentación de obras de edificación, de igual forma relleno en sustitución de suelos problemáticos (López-Lara *et al.* 2005, López-Lara *et al.* 2006, Rama *et al.* 1988).

Por sus propiedades aislantes es frecuentemente utilizado como material principal en la elaboración de ladrillos en sitios con climas extremos ya sea de frío o calor, o bien con este se realizan bloques de suelo denominados sillares para construcción de muros, en los cuales se recomienda alternar con el uso de tabique rojo recocido para alcanzar mayor resistencia. En este sentido desde el año 2005 se ha incorporado una metodología de trabajo para la producción de bloques de tierra comprimida (un tipo de adobe mejorado), dichos bloques son realizados con una capa dura de tepetate, siendo la sustancia de consolidación, tiza y agua (Rodríguez, 2006).

Tabla 2.2 Requisitos de calidad de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos

Características	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6$ {1}	$\Sigma L \geq 10^6$ {1}
Limite Líquido ^{2} , máximo	30	25
Índice Plástico ^{2} , máximo	10	6
Valor Soporte California (CBR) ^{2,3} , mínimo	50	60
Equivalente de arena ^{2} , mínimo	30	40
Desgaste Los Ángeles ^{2} , máximo	50	40
Grado de compactación ^{2,4} , mínimo	100	100

⁽¹⁾ ΣL = Numero de ejes equivalentes acumulados, de 8.2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

⁽²⁾Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponda, de los manuales que se señalan en la Cláusula C, de esta Norma.

⁽³⁾Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

⁽⁴⁾Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO modificada salvo que el proyecto o la secretaria indiquen lo contrario.

Fuente: Nom-CMT-4-02-001/11 "Materiales para Subbases", SCT, 2011.

En el sector carretero su función está enfocada principalmente, en la formación de terraplenes o relleno de capas de baja resistencia en la estructura del pavimento. Dentro de las capas del pavimento más relevantes y comunes en las que se utiliza el tepetate es en la construcción de subbases, en la cual requiere cumplir con parámetros de calidad mínimos necesarios para proporcionar la resistencia mecánica a los esfuerzos provocados por el tránsito vehicular, los requisitos de calidad de los materiales (tabla 2.2) están definidos para ciertos intervalos de volumen de tránsito en función del número ejes equivalentes acumulados de 8.2 ton esperados durante la vida útil del pavimento .

Así mismo el material deberá tener las características granulométricas que se muestran en la figura 2.2, considerando que el tamaño máximo de sus partículas no será mayor de veinticinco (25) por ciento el espesor de la subbase. La curva granulométrica formada deberá ser semejante a las mostradas sin presentar cambios bruscos de pendientes que reflejen una mala graduación en el tamaño del agregado, ni un exceder el 25 por ciento de material fino presente.

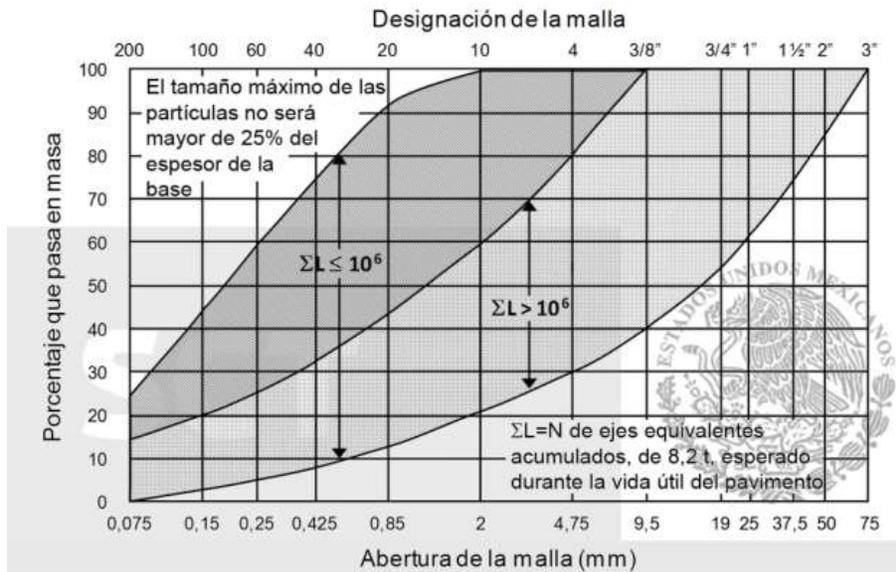


Figura 2. 2 Zonas Granulométricas recomendables de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos.

Fuente: Nom-CMT-4-02-001/11 “Materiales para Subbases”, SCT, 2011.

Importante también resaltar que la viabilidad de este material para su aprovechamiento en la industria de la construcción (figura 2.3) se deriva principalmente de su ligereza reflejada en que su extracción no requiere equipo especializado, aunado a la economía por ser encontrado en abundantes cantidades, que lo convierten en uno de los agregados preferidos de los constructores.



Figura 2. 3 Utilización del tepetate en la industria de la construcción

2.3 Mejoramiento de Suelos

2.3.1 Generalidades

En el desarrollo de los procesos constructivos, inevitablemente te enfrentas con la problemática de cimentar infraestructura sobre suelos problemáticos, que no cumplen con las propiedades ingenieriles óptimas para la ejecución de la obra. Según Ingles y Metealf (1972) ante esta dificultad tienes tres alternativas de decisión: Aceptar el material tal como se encuentra asumiendo los riesgos que conlleva su baja calidad, eliminar el material insatisfactorio sustituyéndolo por otro de mejores características, o bien modificar las propiedades del material existente para convertirlo en un suelo competente a los requerimientos necesarios.

La última alternativa es la que da lugar al mejoramiento de suelos, que se enfoca al incremento de las propiedades mecánicas de un material en estado natural, las propiedades más importantes que se deben de mejorar son: Resistencia, Estabilidad volumétrica, durabilidad y permeabilidad, coadyuvando al control de problemas geotécnicos de estabilidad, capacidad de carga, hinchamiento-colapso, y erosión (Rico y Del Castillo, 1982)

La expansión demográfica de zonas urbanas en todo el mundo, provocó que fuera necesario la utilización de sitios con suelos de bajas propiedades mecánicas, que aunado a las restricciones ambientales y el rápido crecimiento económico que impulsó el desarrollo de nuevas tecnologías, contribuyeron a que el mejoramiento de suelos se convirtiera en parte fundamental de la infraestructura para el desarrollo de proyectos, desde varias décadas atrás y hasta la actualidad.

2.3.2 Métodos para el mejoramiento de suelos

Existe una gran diversidad de métodos de mejoramiento de suelos, que constantemente incrementan su campo de aplicación y/o aparecen nuevas técnicas. Sin embargo, los principales métodos utilizados en la práctica actual

están clasificados en 8 categorías basados en sus principios básicos, descritos a continuación según (Terashi y Juran, 2000; Munfakh.y Wyllie, 2000):

2.3.2.1 Reemplazo

La técnica consiste en el simple y seguro concepto de remover el suelo blando o problemático y sustituirlo por un suelo foráneo de calidad óptima y similar peso para conservar la estabilidad o bien evitar asentamientos de la estructura. En principio el material preferido a utilizar en este proceso era la grava y arena por que presentaba un mejor comportamiento que los suelos blandos, orgánicos, limosos y/o arcillosos, empero se encontró que esta arena o grava suelta en estado saturado presentaba serios problemas a la estructura en regiones sísmicas.

Pese a la sencillez de este método, su problema radica en escasez de materiales granulares de buena calidad y los problemas sísmicos de la zonas. En México un ejemplo del uso de este método fue en la construcción del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México donde el tezontle fue utilizado como material de remplazo debido a su ligereza y resistencia satisfactoria.

2.3.2.2 Densificación

Es una práctica utilizada en materiales granulares sueltos, heterogéneos y licuables, cuyo propósito de densificar un suelo es incrementar su resistencia y reducir asentamientos. La tecnología pionera de esta categoría son los pilotes cortos de madera que se hincan en la capa de arena suelta.

En la superficie se puede lograr la densificación con simples rodillos, la dificultad se presenta a mayores profundidades en las que se requiere técnicas especializadas para lograr la densificación, como: Vibrocompactación, Compactación dinámica, Compactación por voladura

Para este método existen factores importantes que pueden afectar la efectividad de la densificación como pueden ser: La cantidad de finos del suelos,

capacidad de disipar la presión de poro en exceso, energía absorbida por el suelo, presencia de cantos rodados y estructuras adyacentes, y el fenómeno de meteorización.

2.3.2.3 Consolidación

En principio es importante conocer el fenómeno de consolidación que en esencia se explica cuando una carga es aplicada sobre una superficie, generando un esfuerzo total que es sostenido por la presión de poro (presión ejercida por el agua), la cual con el tiempo se disipará provocando una disminución en el volumen del suelo y a la vez un incremento del esfuerzo efectivo (parte del esfuerzo total soportado por la estructura sólida del suelo) y en su resistencia.

Desafortunadamente, esta mejora tiene la problemática de causar una disminución del volumen y en consecuencia deformación del suelo. Para aminorar estos impactos en la estructura, el suelo recibe un proceso de preconsolidación bajo cargas mayores a las de diseño, con el fin de lograr que las deformaciones se logren antes de la construcción de la estructura. Básicamente hay tres métodos del mejoramiento de suelo por consolidación: Precarga con o sin drenes verticales, Electro-osmosis, Consolidación por vacío.

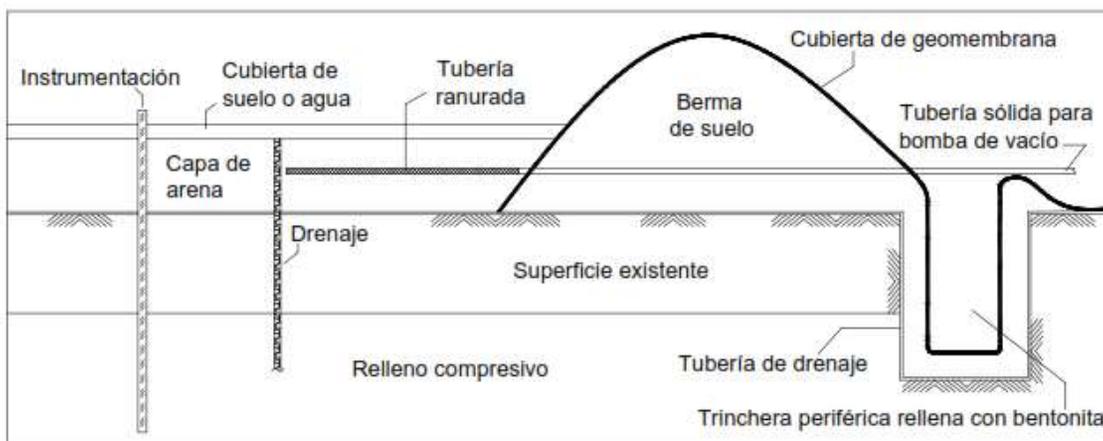


Figura 2. 4 Concepto de consolidación por vacío.

Fuente: Thevanayagm et al., 2001

Para los métodos de electro-ósmosis y consolidación por vacío, presentan la limitación a ser aplicado en áreas pequeñas para asegurar una buena eficiencia.

Actualmente los drenajes verticales son también utilizados para disminuir el potencial de licuación del suelo al cumplir como disipadores del exceso de presión de poro inducida en terremotos.

Los factores primordiales para la eficacia del mejoramiento por consolidación son: la estabilidad durante la colocación de la sobrecarga, evitar obstrucciones de los drenajes verticales, mantenimiento del vacío sobre el suelo.

2.3.2.4 Tratamiento Químico

Es un procedimiento de mejora de características de resistencia, deformación y permeabilidad del suelo, mediante la mezcla con aditivos, siendo posible por el intercambio de iones en los minerales de la arcilla, que une las partículas del suelo por la reacción de productos químicos. Los aditivos de mayor utilización son la cal y el cemento por su fácil disposición y su economía.

Cuando este procedimiento de estabilización se realiza en la superficie, los aditivos químicos son mezclados con el suelo y agua en cantidades apropiadas, posteriormente se compactan mediante procedimiento convencionales. La diferencia radica cuando se realiza a profundidad, que generalmente se utilizan técnicas de inyección o mezclado profundo, como lo son: Grouting, Jet grouting, Mezclado profundo, Columnas de Cal, Inyección de fractura.

El tratamiento químico está sujeto a los siguientes factores que determinaran su eficacia: la reacción y compatibilidad de suelo-lechada, parámetros operacionales, verticalidad de las columnas y efectos con la intemperie.

La figura 2.5 muestra la compatibilidad de varias técnicas de inyección con respecto al tamaño granular del suelo.

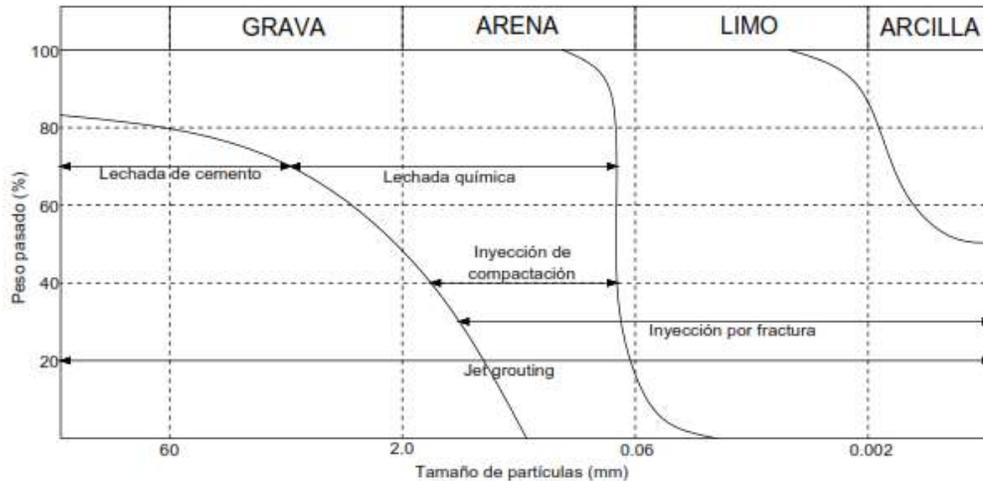


Figura 2. 5 Clasificación de método de inyección por tipo de suelo.

Fuente: Elías et al 1999

2.3.2.5 Estabilización térmica (calentamiento y congelamiento)

Los suelos finos son mejorados por secado, a temperaturas ordinarias bajo el sol, muestra de ello es la cubierta seca formada en la superficie por los lodos, sin embargo se ha demostrado que el calentamiento artificial es más efectivo. Una técnica para originar temperaturas extremas (1600-2000°C) logrando vitrificar el suelo es por medio de corrientes eléctricas, colocándose electrodos de grafito para conducir la electricidad por el suelo. Al derretirse el suelo se convierte en conductor de electricidad y un medio para la transferencia de calor. Esta técnica es efectiva para suelos contaminados por compuestos orgánicos, inorgánicos y radioactivos.

En relación al congelamiento de un suelo y su efecto en la resistencia dependerá de varios factores como el tipo de suelo, contenido de agua y velocidad de congelación. Los sistemas usualmente utilizados para el congelamiento son dos: un sistema abierto donde el refrigerante (nitrógeno líquido o dióxido de carbono) se disipa en la atmosfera después de absorber energía, el segundo es un sistema hidráulico de circuito cerrado mediante una planta mecánica convencional y un refrigerante circulante. Esta técnica utilizada para incrementos

de resistencia temporales y cierres de filtraciones de agua a cielo abierto, excavación de ejes y tunelajes. El suelo congelado se acerca a ser una material impermeable. El congelamiento ha ido recibiendo gran aceptación como medida temporal de excavaciones en áreas urbanas.

2.3.2.6 Reforzamiento

El objetivo es lograr una estructura de suelo reforzado por medio de inclusiones de elementos de refuerzo en direcciones predeterminadas para mejorar las características de resistencia al corte y capacidad de carga de un suelo. Las tecnologías de reforzamiento dependiendo de su aplicación en la ingeniería, se diseñan para resistir fuerzas de tensión, compresión, flexión o sus combinaciones, presentes en la vida útil de la estructura.

Los métodos que generalmente se utilizan para el reforzamiento de suelos son: Estabilización mecánicas, Clavado del suelo, Anclaje de suelo, Micropilas, Columnas de piedra, Reforzamiento por fibra.

Las problemáticas presentes que intervienen en el reforzamiento del suelo son: la transferencia de carga a las fibras de refuerzo, la superficie de falla, la compatibilidad de tensión entre suelo y material de refuerzo, el acomodo de los elementos de refuerzo, así como la durabilidad y comportamiento a largo plazo del refuerzo.

2.3.2.7 Electro-tratamiento

Este método aplica corrientes eléctricas al suelo para retirar contaminantes en forma mesurada, remediando suelos contaminados. Los métodos utilizados en la geotecnología ambiental son: Remediación electrocinética (extracción de iones como metales pesados), Calefacción eléctrica (Compuestos orgánicos volátiles), Valla electrocinética (inmoviliza cualquier contaminante que los atraviese), Inyección bioelectrocinética (sistema de transporte de nutrientes para la biodegradación de contaminantes orgánicos tóxicos).

Los factores clave para el tratamiento eléctrico son: la conductividad eléctrica del suelo, la caracterización iónica de los contaminantes, así como el impacto en los objetos enterrados y servicios públicos.

2.3.2.8 Estabilización Biotécnica

Esta técnica de mejoramiento de suelos utiliza elementos biológicos como la vegetación para proporcionar refuerzo, es muy utilizada para la estabilización de taludes o rellenos con pendiente, también en estructuras de contención en zonas medioambientalmente sensibles. La estabilización biotécnica es más económica y medioambientalmente amistosa que otras formas de mejoramiento de suelos, además de mejorar el paisaje proporcionando una ventaja estética.

Actualmente las técnicas más utilizadas en esta forma de mejoramiento son: hincado de ramas, estratificación de maleza, estratificación por zanjas de caña, esteras de maleza y malla perimetral. De las mencionadas, la técnica de hincado de ramas y estratificación de maleza son las más usadas en campo (Gray y Leiser, 1983).

La presente investigación plantea el mejoramiento de suelos mediante la implementación e interacción de dos de las metodologías de mejoramiento antes mencionados, el tratamiento químico mediante cal y el refuerzo mediante fibras, que en conjunto tienen el objetivo fundamental de obtener un compuesto resistente, durable y económico, aprovechable en la industria de la construcción y aún más en el sector de las vías terrestres. En los capítulos subsecuentes se realiza una descripción profunda y particular a cada técnica empleada en esta investigación.

2.4 Tratamiento Químico con Cal

2.4.1 Definición de cal

La cal es un químico natural conocido por la humanidad desde tiempos remotos. Se obtiene de la roca sedimentaria caliza que forma parte de la naturaleza, con un alto contenido de pureza como carbonato de calcio (CaCO_3). Dicha roca se descompone por la acción del calor, a temperaturas de entre 880°C y 900°C produciendo u obteniendo el óxido de cal (CaO) conocido con el nombre de cal viva (figura 2.6) (ANCADE, 1997).

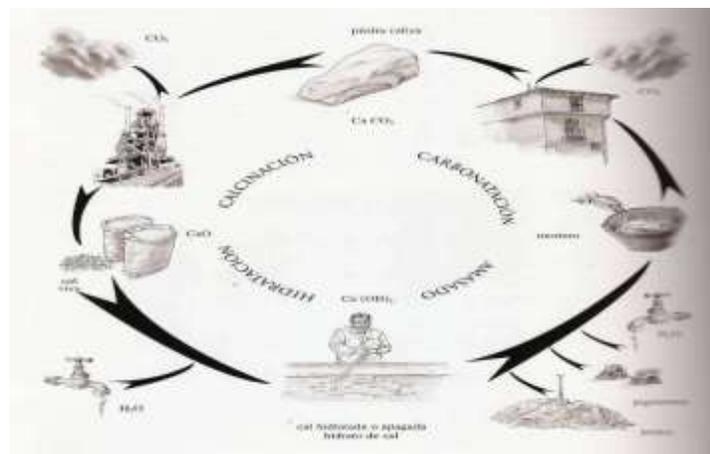


Figura 2. 6 Ciclo de la cal.

Fuente: Grupo Calidra, 2007

De acuerdo a expertos geológicos, coinciden que la piedra caliza (figura 2.7) que es la materia prima para obtener la cal, debe estar compuesta de cuatro minerales, la calcita (CaCO_3), aragonita (CaCO_3), Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y magnecita (MgCO_3) (Guerrero, 2001).

La cal más utilizada para el tratamiento de suelos es la cal alta en calcio (Calcicas), que contiene un máximo de 5% de óxido o hidróxido de magnesio. Sin embargo, en algunas ocasiones se utiliza cal dolomítica (DL). La cal dolomítica contiene de 35 a 46% de óxido o hidróxido de magnesio. Con la cal dolomítica se

puede lograr la estabilización, aunque la fracción de magnesio reacciona más lentamente que la fracción de calcio, (National Lime Association, 2004).



Figura 2. 7 Piedra caliza, carbonato de calcio (CaO₃).

Fuente: Grupo Calidra, 2007

. La cal hidratada (hidróxido de calcio) es la que reacciona con las partículas arcillosas y las transforma permanentemente en una fuerte matriz cementante.

2.4.2 Tipos de cal

Se denomina cal a las formas físicas y químicas en las que pueden presentarse los óxidos o hidróxidos de calcio y magnesio. Se clasifican en forma general como (figura 2.8): (National Lime Association, 2004 y ANCADE, 1997)

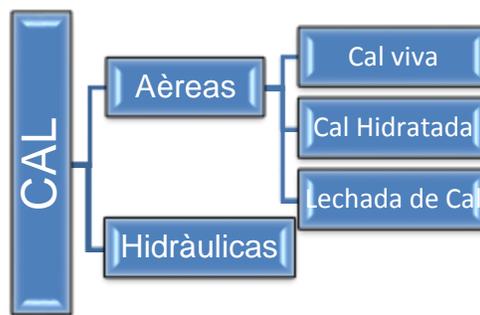
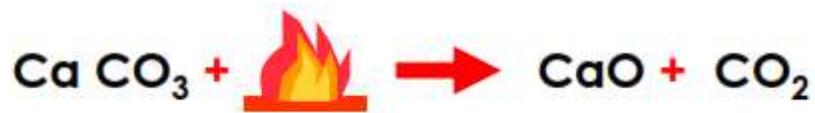


Figura 2. 8 Clasificación general de la Cal

2.4.2.1 Cales aéreas

Son calces compuestas fundamentalmente de óxido e hidróxido de calcio y magnesio, que endurecen gradualmente al aire mediante la acción del CO₂ de la atmosfera. No presentan propiedades hidráulicas, es decir, no endurecen con el agua y se obtienen a partir de rocas calizas con contenidos en carbonatos superiores al 95%. En la estabilización de suelos se utilizan calces aéreas. En las siguientes formas:

Cales vivas.- Son calces aéreas que se componen principalmente de óxido de calcio y óxido de magnesio producidas por calcinación de la caliza.



Su forma comercial es en grano o molidas y en ocasiones micronizadas. Sufren hidratación en contacto con el agua en una reacción fuertemente exotérmica

Cales Hidratadas.- Proviene de la hidratación controlada de calces vivas, son calces aéreas que se componen principalmente de hidróxido de calcio.



Este tipo de cal presenta menor reacción exotérmica que la cal viva al entrar en contacto con el agua.

Cal en forma de lechada.- Es la suspensión de cal hidratada en agua, pudiéndose obtener también de la cal viva que al mezclarla con agua formara la cal hidratada, y con el resto del agua se crea la suspensión de lechada de cal.

La utilización de lechada de cal en el tratamiento de suelos plantea las siguientes ventajas: Eliminación del polvo producido en el extendido de la cal, y la humectación de los suelos secos.

La preparación de cal en forma de lechada puede realizarse a partir de cal viva o hidratada, realizado en fábrica o in situ, mediante depósitos con algún

sistema de agitación o mezclado, para posteriormente ser aplicado directamente en el suelo.

2.4.2.2 *Cales hidráulicas*

Son cales que endurecen en contacto con el agua, obtenidas a partir de piedras calizas que contienen arcillas (Sílice y Alúmina). Durante la calcinación y la posterior hidratación se forman silicatos y aluminatos cálcicos de propiedades hidráulicas.

2.4.3 Aplicaciones de la cal

Son diversas las aplicaciones encontradas para el uso de la cal (figura 2.9), como pueden ser:

- Mezclas para junteo, repellado y aplanado: Las mezclas con cal hidratada son capaces de conseguir trabajos de albañilería estables, con adherencia completa, presentando mejor trabajabilidad, mayor plasticidad y consistencia adecuada. Derivado de su peso específico inferior que el del cemento y de la arena; se logra un mayor volumen de mezcla con la misma proporción en peso, representando un rendimiento mayor.
- Concreto: La inclusión de cal hidratada a la estructura del concreto (Cemento, arena y grava), proporciona mayor fluidez, protege al acero de refuerzo, incrementa la permeabilidad y reduce los costos significativamente
- Estuco: La pasta para enlucir paredes, interiores o molduras, realizada con mezcla de cal hidratada y agregado fino, es considerada una mezcla de revestimiento continuo que resulta adecuado para dar acabados finos y textura lisa.
- Pintura e impermeabilizante: La pintura de cal hidratada se utiliza tradicionalmente para cubrir superficies, protegiendo y mejorando la estética de la superficie a bajo costo. En forma de impermeabilizante es

utilizado desde épocas prehispánicas para evitar o disminuir la filtración de agua en las edificaciones.

- Adobes estabilizados: Las construcciones con adobes estabilizados con cal hidratada, son una opción que además de ser ecológica y económica, proporciona beneficios como aislamiento térmico, impermeabilidad, alta resistencia a los movimientos o vibraciones, creando estructuras más duraderas
- Bloques Vibrocomprimidos: La fabricación de bloques vibrocomprimidos con adición de cal hidratada es su formulación, mejora las propiedades mecánicas a largo plazo, facilita el desmolde y curado, consiguiendo calidad en los acabados y un incremento en la resistencia final. Los muros realizados con este material presentan uniformidad, mayor impermeabilidad y buena apariencia.
- Estabilización de suelos: con este sencillo proceso de transformación se obtiene un incremento en su resistencia y capacidad de soporte, disminución de la sensibilidad al agua y a cambios volumétricos. Derivado de la importancia en la presente investigación y mayor aun en el aprovechamiento de los suelos enfocados a las vías terrestres, se profundizara estos procedimientos en el siguiente capítulo.



Figura 2. 9 Algunas aplicaciones de cal hidratada en la industria de la construcción

2.4.4 Estabilización de suelos con cal

Cuando un suelo es inestable provoca una serie de problemáticas estructurales que coadyuvan a fallas geotécnicas relevantes. El tratamiento químico con cal realizado eficazmente convierte un suelo inestable en materiales utilizables. Los suelos estabilizados con cal son comúnmente aprovechados en la construcción de pavimentos por el soporte estructural que proporcionan.

Un suelo estabilizado cambia notablemente las propiedades del mismo, creando un suelo resistente y estable a lo largo de tiempo, en forma permanente, principalmente controlando el efecto de la acción del agua (figura 2.10), (National Lime Association, 2004)



Figura 2. 10 Capa estabilizada con cal soporta la erosión.

Fuente: National Lime Association, 2004

La cal puede ser utilizada en el tratamiento de suelos, en varios niveles o cantidades que dependerá del objetivo que se persiga. Pequeñas dosificaciones de cal se utilizan para un secado y modificación temporal de suelos, que originan una plataforma de trabajo ampliamente utilizada para la construcción de caminos temporales. En mayores cantidades que implica un mayor grado de tratamiento resulta en una estabilización estructural y permanente del suelo, lo anterior respaldado en pruebas, diseño y técnicas apropiadas de ejecución, (Sampedro, 2005)

El uso vial más importante de la cal es el de estabilizar suelos, para estos fines se emplea la cal hidratada en polvo, que viene envasada en bolsas de papel facilitando de esta manera su manipulación y transporte.

La cal hidratada (cal aérea) que se emplea en la estabilización de suelos debe reunir los requisitos de la Norma ASTM C 977-02 en cuanto a su composición química y tamaño de grumos, Tabla 1.1. (Garnica, 2003).

Tabla 2.3 Especificaciones Químicas y Físicas de la Cal hidratada

Composición química

Oxido de calcio y magnesio	90.00 máximo
Dióxido de carbono	5.00 máximo
Agua libre	2.00 máximo

Propiedades físicas

Retenido en la malla No. 30	3% máximo
Retenido en la malla No. 200	25% máximo

Fuente: Garnica, 2003

Una gran variedad de tipo de suelos pueden ser tratados con la inclusión de cal o en combinación con otros aditivos, el nivel de reactividad con la cal y por consiguiente la resistencia final que la masa de suelo desarrollará, lo define fundamentalmente las propiedades mineralógicas del suelo en cuestión. Generalmente, los suelos arcillosos de grano fino, es decir con más del 25% de material que pasa el tamiz 200 y un índice de plasticidad mayor que 10, son buenos candidatos para la estabilización.

Capas de la estructura del pavimento son igualmente susceptibles a ser estabilizadas mediante el tratamiento de la cal, entre las cuales se encuentran (National Lime Association, 2004):

Subrasante (o subbase).- El suelo fino utilizado en capa de subrasante o subbase puede ser tratado mediante cal, creando una superficie con una

capacidad portante significativa en el sistema del pavimento. Los suelos tratados pueden ser del lugar (subrasante) o bien, de materiales de préstamo. La estabilización de la subrasante por lo general implica mezcla en el lugar y generalmente requiere la adición de cal de 3 a 6 por ciento en peso del suelo seco.

Bases: La cal puede estabilizar permanentemente materiales que no cumplen con las características mínimas para funcionar como una base (como la grava con arcilla, gravas "sucias", o bases contaminadas en general) que contienen al menos el 50 por ciento de material grueso retenido en la malla o tamiz No. 4. La estabilización de bases es utilizada para la construcción de caminos nuevos y para la reconstrucción de caminos deteriorados, y generalmente requiere la adición de 2 a 4 por ciento de cal respecto al peso del suelo seco. La mezcla en el lugar se usa comúnmente para la estabilización de bases, sin embargo, la mezcla en planta también puede ser utilizada.

2.4.5 Interacción Suelo-Cal

La incorporación de cal viva o hidratada a una masa de suelo natural, provocan la ocurrencia de reacciones químicas inmediatas y a largo plazo, que derivan en tres procesos principalmente (National Lime Association, 2004):

Secado.- la reacción química de la cal viva al hidratarse provoca la liberación de calor, provocando un efecto de secado en el suelo, en gran parte por que el agua presente participa en la reacción, y que el calor liberado puede evaporar la humedad restante. Una reacción altamente exotérmica demostrando que el calor generado por la hidratación de un kilogramo de cal viva permite elevar la temperatura de 0°C a 100°C de 2.79 litros de agua. Posteriormente la cal hidratada reaccionara con las partículas de arcilla, provocando a su vez un secado adicional, que lentamente van reduciendo la humedad del suelo y logrando un mejor soporte. Si se utilizan la cal hidratada o la lechada de cal hidratada, en lugar

de la cal viva, el secado ocurre sólo por los cambios químicos del suelo, que reducen su capacidad para retener agua y aumentan su estabilidad.

Modificación.- Iniciada la mezcla, los iones de calcio (Ca^{++}) propios de la cal hidratada se desplazan a la estructura de las partículas arcillosas y desplazan el agua y otros iones. El suelo se hace disgregable y granula, que hacen del mismo trabajable y fácil de compactar. En esta etapa, el Índice de Plasticidad del suelo disminuye drásticamente, así como lo hace su tendencia a cambios volumétricos. El proceso, llamado "floculación y aglomeración", que resulta en la formación de partículas más gruesas, generalmente ocurre en el transcurso de horas.

Estabilización.- para lograr la estabilización es necesario encontrar las cantidades adecuadas de cal y agua, con las que el pH aumenta rápidamente a niveles superiores de 10.5, que permite romper las partículas de arcilla las cuales liberan sílice y alúmina y que reaccionaran con el calcio de la cal para la formación de hidratos de calcio-silicatos (CSH) e hidratos de calcio-aluminatos (CAH). Estos silicatos y aluminatos que son productos cementantes análogos a los formados en el cemento portland, constituyen la matriz que contribuye a la resistencia de las capas de suelo estabilizadas. La matriz resultante transforma un material arenoso granular en una superficie fuerte significativamente impermeable, con una capacidad estructural y flexibilidad significativa. El proceso se inicia en unas horas y puede continuar durante años, en un sistema diseñado correctamente.

Como consecuencia de los anteriores efectos, la acción de la cal produce un notable incremento de la resistencia y rigidez del suelo que pierde plasticidad.

La determinación de la cantidad de cal necesaria es parte del proceso de diseño y se estima por pruebas como la de Eades y Grim (1966), indicado en la norma ASTM D6276. Que es un método muy útil para realizar la estabilización con cal, por su rapidez y fiabilidad es basar el estudio para la estabilización en el método del pH. Este procedimiento se basa en el hecho de que la adición de cal

necesaria para estabilizar un suelo es aquella que garantiza el mantenimiento de un elevado pH que permita el desarrollo de las reacciones puzolánicas. Para ello, se ensayan muestras con distintos porcentajes de cal, midiéndose el pH en determinadas condiciones. El porcentaje óptimo es aquel que permite alcanzar el valor de 12.4, Figura 2.9. Al elevar la cal el pH del suelo estabilizado hasta valores de 12,4, se libera sílice y alúmina de la arcilla que reaccionan con los iones calcio procedentes de la cal, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que, como en el caso de los cementos portland, incrementan la resistencia mecánica.

Esta reacción de tipo puzolánico es progresiva con el tiempo y aumenta la impermeabilidad, la resistencia mecánica y la resistencia a las heladas del suelo tratado. Los porcentajes necesarios de cal para garantizar la permanencia de las reacciones puzolánicas a lo largo del tiempo oscilan entre el 3 y 8 por ciento (Sampedro, 2005).

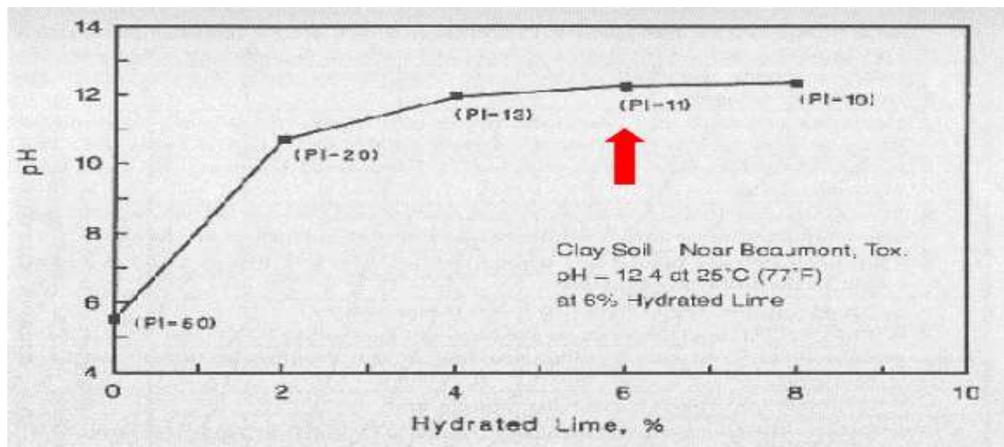


Figura 2. 11 Método de Eades y Grim basado en el PH para obtener el porcentaje óptimo de cal hidratada.

Fuente: Sampedro, 2005

Para determinar el contenido óptimo de cal se monitoreó la reducción que se presenta en el Índice Plástico (IP) para diferentes contenidos de cal. Un contenido de cal es el óptimo si limita al Índice Plástico a un valor máximo de 15%. (Sampedro, 2005).

2.5 Refuerzo con fibras

2.5.1 Fibras de refuerzo

Las fibras son el componente resistente en un material reforzado con ellas y definen la mayor parte de las características mecánicas del material, como la resistencia y la rigidez.

La presencia de fibras provee una resistencia extra a la compactación, provocando un confinamiento menos denso a medida que incrementa el contenido de fibras. Si se compara el comportamiento del suelo con diferentes contenidos de fibras pero mediante la misma energía de compactación, se obtendría una menor compactación del suelo reforzado comparado con el suelo sin reforzar (Ibraim y Fourmont , 2006).

El suelo reforzado denominado así por las mejoras en sus propiedades mecánicas, que en muchos sentidos se considera similar al concreto reforzado, debido a que dicha mejora se logra por el refuerzo colocado paralelamente a la dirección principal de la deformación tratando de compensar la falta de resistencia a tensión propia del suelo.

Las propiedades a tensión mejoradas son el resultado de la interacción entre el refuerzo y el suelo. El composite resultante se caracteriza por una transferencia continua de esfuerzos a lo largo del refuerzo, mediante fricción y/o resistencia pasiva que dependerá del tipo de geometría de la fibra, partiendo del supuesto de que estas se encuentran distribuidas aleatoriamente en toda la masa de suelo para que no presente planos de debilidad y con ello absorber la energía aplicada al suelo bajo cualquier condición de carga generando estabilidad en el sistema, y para lograrlo el proceso de mezclado será un factor clave (Elias *et al.* 2001). Las fibras incrementan la unión entre las partículas del suelo, que aunado a la flexibilidad e interacción entre las fibras resultan en un comportamiento semejante a una malla estructural, que sostiene el suelo aumentando su soporte, con la ventaja de ser económicas y ambientalmente amigables, y su aprovechamiento abarca a todos los tipos de suelos (Babu y Vasudevan, 2008).

2.5.2 Tipos de fibra de refuerzo

En el análisis de las investigaciones sobre el tema de suelos reforzados con fibras, podemos diferenciar su campo de aplicación en dos ramas principalmente (figura 2.13), la primera enfocada al uso de fibras naturales y en segunda a las fibras que son producidas por el hombre, denominadas comúnmente como fibras artificiales. La diferencia radica en su génesis, siendo las primeras obtenidas de la naturaleza sin necesidad de realizar ningún proceso industrial, caso contrario para las fibras artificiales que intervienen procesos industriales o incluso el reciclaje de desechos de algunos productos de la industria (Sayyed *et al.* 2011).

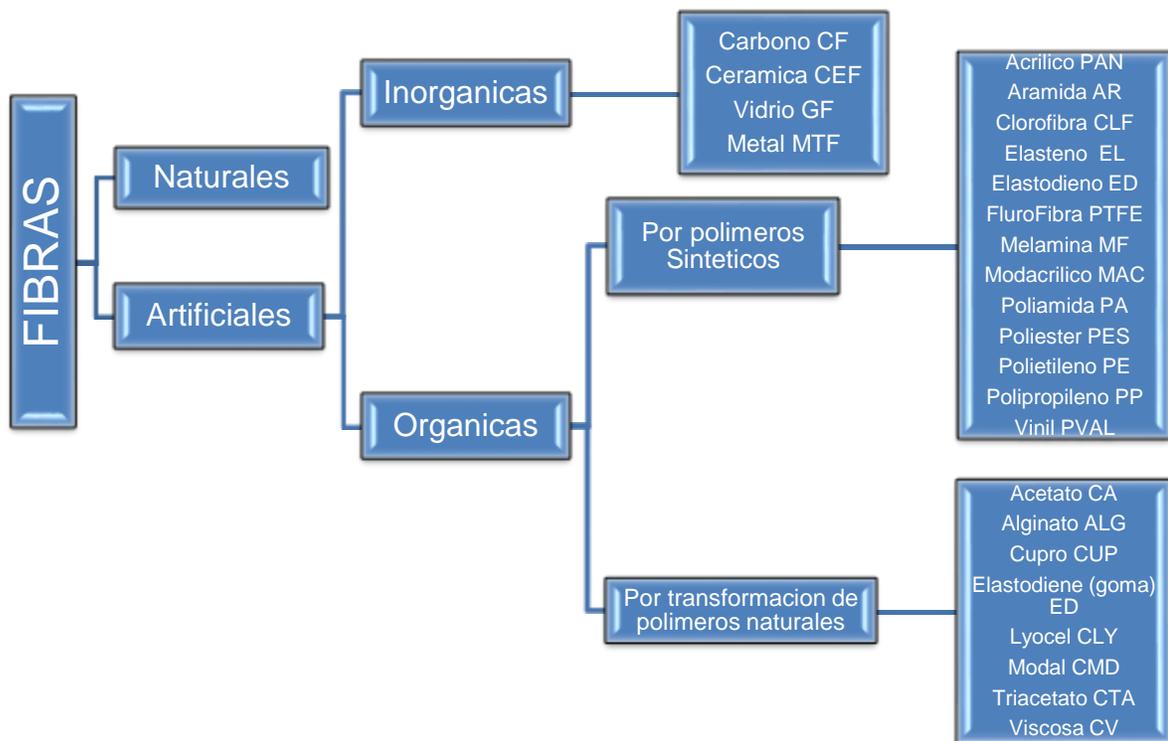


Figura 2. 12 Clasificación de las Fibras

Fuente: BISFA= The International Bureau for the standardization of man-made fibres

2.5.2.1 Fibras Naturales

El refuerzo de suelos mediante fibras naturales constituye una técnica de mejoramiento de suelos ecológicamente amigable y de muy bajo costo. El uso de estas fibras parece ser prometedor en países subdesarrollados donde las fibras naturales son obtenidas a partir de los restos de frutas y plantas usadas en la industria alimenticia. Cabe mencionar que las fibras naturales se han utilizado durante mucho tiempo en materiales compuestos de bloques de tierra y cemento derivado de su disponibilidad y bajo costo. Por esta y muchas necesidades actuales enfocadas en conciencia ambiental y con el propósito de obtener materiales ecológicos es que estas fibras obtienen mayor relevancia, a continuación se describen algunas de las fibras naturales (figura 2.14) más utilizadas y sus características (Sayyed *et al.* 2011):

- a) **Coco.-** El material fibroso se obtiene de la cubierta exterior de un coco maduro. Normalmente se encuentran en dimensiones de 50 a 350 mm de largo, tienen gran capacidad de absorción de agua, son duraderas con una vida útil entre 4 a 10 años (Rowell *et al.*, 2000). Así mismo Ayyar *et al.* (1989) y Viswanadham, (1989) han informado acerca de la eficacia de la distribución aleatoria de fibras de coco para la reducción de la tendencia del fenómeno de hinchamiento del suelo.
- b) **Sisal.-** La fibra de sisal se extrae de las hojas de las plantas de longitud variable, con un diámetro que varía de 0.06 a 0.4 mm, Usada como refuerzo para las hojas de tableros de yeso en la industria de la construcción (Kishore y Rao, 1986). En investigación de Ghavami *et al.* (1999) encontró que la inclusión de estas fibras, impartió una considerable ductilidad y aumenta ligeramente la resistencia a la compresión.
- c) **Palma.-** Estas fibras extraídas de palmeras tienen propiedades especiales, como los bajos costos, ligereza, y durabilidad implícita en su resistencia al deterioro (Yusoff *et al.*, 2010). De acuerdo con Ahmad *et al.* (2010) reporto

que mezcla de fibras palma con un suelo areno limoso, aumenta la resistencia al corte durante ensayos de compresión triaxial.

- d) **Yute.-** Se extrae de la corteza fibrosa de las plantas de yute, cultivadas en abundancia en Bangladesh, China, India y Tailandia (Swamy, 1984). El yute es actualmente utilizado para producir geotextiles porosos para aplicaciones en filtración, drenaje y estabilización de suelos. Un ejemplo de este, es el Geojute que es el nombre comercial de un producto tejido a partir de fibras de yute utilizado para la estabilización de suelos en ingeniería de pavimentos.
- e) **Lino.-** El lino es probablemente la fibra textil más antigua conocida por la humanidad, se ha utilizado en la producción de tela de lino, con longitudes de fibra en promedio de 85 mm (Harriette, 2004). La investigación de Segetin *et al.* (2007) encontró que la adición de fibras de lino se mejora la ductilidad del material compuesto de suelo-cemento.
- f) **Paja.-** La paja de cebada es la fibra más común cultivada en casi todas las zonas rurales de todo el mundo, se utiliza para producir bloques de tierra compuesto con mejores características. El adherir paja al suelo, muestra efectos positivos en términos de las propiedades mecánicas del composite, tales como: la reducción de la contracción y del tiempo de curado así como de mejorar la resistencia a la compresión y al esfuerzo cortante (Bouhicha *et al.*, 2005).
- g) **Bambú.-** Las fibras producto del bambú son notablemente fuertes a tensión, pero tienen bajo módulo de elasticidad y alta absorción de agua. Ramaswamy *et al.* (1983) estudio el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de bambú, pero en suelos puede considerarse un campo fértil para la investigación.
- h) **Caña.-** El bagazo es el residuo fibroso que se obtiene de la producción de la caña de azúcar después de la extracción del jugo, el diámetro de las fibras oscilan entre 0.2-0.4 mm. Se han introducido recientemente en el

mercado, paneles de cemento producidos a partir de residuos de la caña, la aplicación de estas fibras en el suelo de refuerzo es una propuesta introductoria al campo experimental. Sin embargo su uso es limitado por los azúcares residuales y limitadas propiedades estructurales.

Existen muchas investigaciones experimentales y un gran interés ha creado en todo el mundo sobre las posibles aplicaciones de las fibras naturales para el refuerzo de suelos en los últimos años. Sin embargo, este tipo de fibras se caracterizan por una baja resistencia química y a la corrosión, lo que sumado a la biodegradación, limitan su uso a estructuras provisionarias y de bajo riesgo frente a una eventual falla por degradación. Para atenuar esta limitación, algunos investigadores proponen el uso de fibras naturales recubiertas con materiales sintéticos. En investigación de Ahmad *et al.* (2010) utilizaron fibras naturales provenientes de la cáscara de frutas de palma recubiertas con termoplástico ABS, se concluyó que las fibras naturales recubiertas contribuyen a incrementar la resistencia al corte del suelo reforzado de manera más significativa que las fibras sin recubrir.

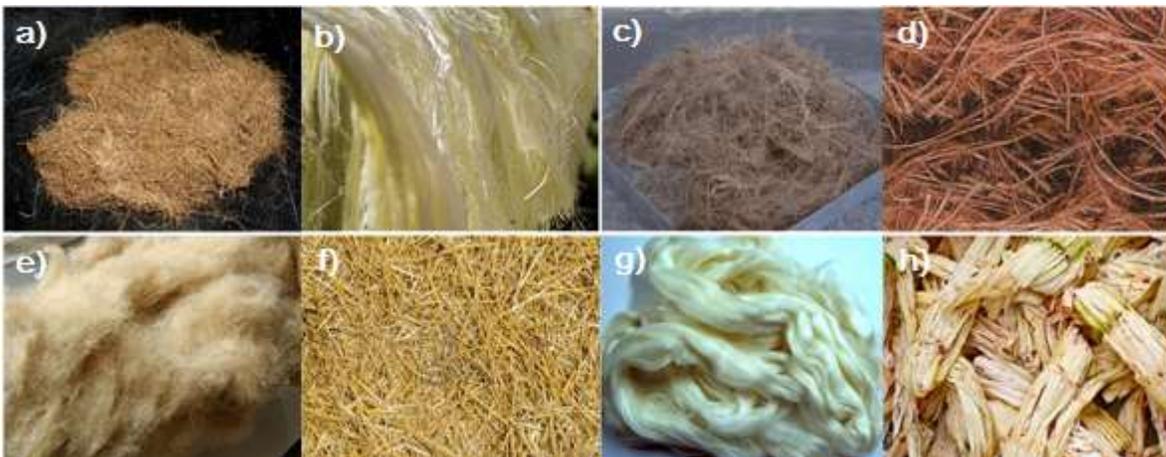


Figura 2. 13 Tipos de fibras naturales para refuerzo

2.5.2.2 Fibras Artificiales

Son muchas las posibilidades a la hora de seleccionar el tipo de fibra a incluir en el suelo reforzado. En general, se buscan materiales sintéticos caracterizados por una alta resistencia mecánica y alta durabilidad.

En lo que respecta al refuerzo de los suelos, las fibras más utilizadas han sido las de polipropileno (PP), poliéster (PET), polietileno (PE), vidrio, nylon y metálicas (figura 2.15) (Sayyed *et al.* 2011).

- a) **Polipropileno PP.-** Las fibras de polipropileno son la inclusión más común en las pruebas de laboratorio de refuerzo de suelos, utilizadas para mejorar las propiedades de resistencia del suelo, reducir problemas de contracción y para reducir la degradación química y biológica. Así mismo se mejoran la resistencia a la compresión no confinada y reducir la presión de expansión en arcillas expansivas (Vasudev, 2007; Puppala y Musenda, 2000).
- b) **Poliéster PET.-** Consoli *et al.* (2002) indicaron que la inclusión de fibra PET en arena fina provee un aumento en la resistencia pico y resistencia residual, que depende sobre todo del contenido de fibra. Así mismo Kumar *et al.* (2006) probaron a influencia de las fibras de poliéster en arcilla altamente compresible y los resultados demuestran que a medida que se incrementa la longitud y contenido de fibra mejora la resistencia a la compresión no confinada del suelo.
- c) **Polietileno PE.-** Se ha demostrado que la adición de fibras PE aumenta la energía de fractura del suelo, mejora la respuesta al comportamiento esfuerzo deformación derivado de la tensión que desarrollan las fibras (Sobhan y Mashand, 2002). Así mismo Choudhary *et al.* (2010) Informaron que la adición de PE promueve el aumento del valor CBR del suelo.
- d) **Vidrio.-** Consoli *et al.* (2004) indicaron que la inclusión de fibras de Vidrio en arena limosa mejora su resistencia pico, así mismo encontró que en el

compuesto de suelo fibroreforzado-cementado, la fibra mejora el comportamiento frágil a uno más bien dúctil.

- e) **Nylon.-** Kumar y Tabor (2003) estudiaron el comportamiento de la fibra de nylon en arcilla limosa, resultando el aumento significativo en la resistencia pico y residual, respecto a las muestras compactadas en su densidad máxima. De igual forma se encontró que una mezcla de fibra de nylon y fibras de yute aumente el valor de CBR del suelo en un 50% más que el suelo sin reforzar (Gosavi et al. 2004).
- f) **Metálicas.-** Los refuerzos de fibras de acero utilizadas para el concreto también son utilizados en el refuerzo de materiales compuestos de suelo-cemento, aumentando la resistencia del suelo. Las fibras, con una resistencia mecánica a la tracción adecuada y distribuidas de forma homogénea en la matriz del material, constituyen una armadura tridimensional muy resistente, capaz de soportar apreciables deformaciones manteniendo una buena resistencia (ductilidad) y de evitar la propagación del fenómeno de figuración disipando la energía de deformación (tenacidad) (Gray y Al-Refeai T, 1986).



Figura 2. 14 Tipo de Fibras Artificiales más utilizadas

Las fibras más frecuentemente utilizadas son las de polipropileno (Consoli *et al.*, 1998; Ibraim y Fourmont, 2006; Zhang *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2007; Jadhao y Nagarnaik, 2008).

En la literatura se muestra que la aplicación de fibras naturales y/o artificiales en ingeniería geotécnica es factible en seis campos, que incluyen la construcción de carreteras (capas de pavimento), muros de contención, terraplenes ferroviarios, protección de taludes, cimentaciones e ingeniería sísmica.

2.5.3 Suelos Reforzados con fibras

Los suelos reforzados mediante la adición de fibras tiene las siguientes ventajas (Li, 2009):

- El refuerzo de fibras puede realizarse mediante el uso de equipos convencionales de construcción. La compactación del suelo reforzado con fibras puede efectuarse con los métodos tradicionales de compactación, sin riesgo de dañar el refuerzo.
- A diferencia de otros métodos de refuerzo y/o estabilización, como la adición de cemento o cal, la incorporación de fibras no se encuentra afectada por las condiciones climáticas.
- Los materiales que pueden ser usados para las fibras son de muy bajo costo, haciendo a este tipo de refuerzo altamente competitivo.

Son numerosas las potenciales aplicaciones de suelos reforzados con fibras: estabilización de taludes, construcción de terraplenes, refuerzos de bases de pavimentos y mejoramiento de suelos potencialmente licuables, entre otros.

Otro concepto de la utilización de fibras en la ingeniería civil es la construcción de cimientos en suelos con pobres capacidades geotécnicas en los que una solución de cimentación profunda resulta económicamente incompatible, la alternativa de solución se realiza a través de la inclusión de elementos discretos distribuidos al azar tales como las fibras (Consoli *et al.*, 2010).

En un informe del 2008 se indica que las pistas de hangares, pistas de rodaje y un helipuerto se han estabilizado mediante el uso de fibras de polipropileno PP y cemento portland de alta resistencia, en los territorios del norte de Australia (Newman y White, 2008).

Parka y Tan, (2005) mostraron que el uso de fibras PP para reforzar un talud de suelo arenolimoso, mejoran la estabilidad del talud y disminuyen las presiones del suelo así como los deslizamientos de talud. Es necesario mencionar que las fibras de polipropileno proporcionan un aumento en la densidad máxima de suelo, así como una reducción de la humedad óptima de la mezcla del orden del 5%. Así mismo encontraron que el uso de geofibras con la combinación de geomallas es una alternativa económica para la construcción de taludes verticales altos en terraplenes ferroviarios.

Según Makiuchi y Minegishi, (2001) la tenacidad y ductilidad que proporcionan las fibras a un suelo reforzado son de gran apoyo para contrarrestar los efectos de un terremoto. Estos autores mencionan que en Japón hay dos técnicas de refuerzo de tierras con fibras sintéticas, la primera con hilados de filamentos continuos se emplean para suelos granulares no cohesivos, y la segunda es la de utilizar fibras discontinuas de longitud corta, implementadas por el instituto de investigación de obras públicas de Japón en 1997.

En las últimas décadas, el hombre ha desarrollado numerosos métodos con el fin de mejorar el comportamiento tenso deformacional de los suelos. Si bien el mejoramiento de suelos mediante la incorporación de fibras es una práctica antigua (un ejemplo de ello es el adobe), su estudio ha adquirido interés recién en los últimos 20 años.

Numerosas variables intervienen en el comportamiento del suelo reforzado con fibras. Entre las principales se pueden citar (Gray y Ohashi, 1983; Consoli *et al.*, 2003; Michalowski y Cermak, 2003; Ibraim y Fourmont, 2006; Jadhao y Nagarnaik, 2008).

- Características de la fibra (tabla 2.4): tipo de fibra, longitud, forma, relación de aspecto (longitud – diámetro), rugosidad.
- Características del suelo: distribución granulométrica; tamaño, forma y rugosidad de partículas; contenido de humedad; entre otros.
- Contenido de fibras.
- Orientación de las fibras.
- Relación de vacíos del suelo reforzado.
- Método de compactación del suelo reforzado

Tabla 2.4 Características mecánicas de las fibras

Fibras	Diámetro (μm)	Densidad (10^3kg/m^3)	Módulo elástico (kN/mn^2)	Resistencia a la tracción (kN/mn^2)	Elongación a la ruptura (%)
Acero	5-500	7.84	200	0.5-2	0.5-3.5
Vidrio	9-15	2.60	70-80	2-4	2-3.5
Amianto	0.02-0.04	3.00	180	3.30	2-3
Polipropileno	20-200	0.90	5-7	0.5-0.75	8
Nylon	-	1.10	4	0.90	13-15
Polietileno	-	0.95	0.30	0.0007	10
Carbono	9	1.90	230	2.60	1
Kevlar	10	1.45	65-133	3.60	2.1-4
Acrílico	18	1.18	14-19.5	0.4-1	3

Fuente: Sarzalejo et al. 2005

En relación a suelos granulares, los estudios en relación a suelos arenosos coinciden que la resistencia al corte pico y resistencia residual se incrementan con el contenido fibras en el suelo. Llegando a un límite asintótico en cuanto se alcanza un determinado contenido de fibra (Gray y Al-Refeai, 1986; Consoli *et al.*, 1998; Ibraim y Fourmont, 2006). Así mismo en la investigación de Jadhao y Nagarnaik (2008) manteniendo un contenido constante de fibras, observaron que la contribución de la misma a la resistencia pico en un suelo reforzado es mejor

con mayores longitudes de fibra, al igual que su capacidad de absorber deformaciones. Por su parte, Michalowski y Cermak (2003) concluyeron que el refuerzo de la fibra es más efectivo cuando la longitud de la misma es mayor comparado con el tamaño de las partículas de suelo, y cuanto más sobrepasa la relación longitud-diámetro de la fibra.

Se ha observado que la deformación necesaria para que el suelo reforzado alcance su máxima resistencia es directamente proporcional al contenido de fibra, que influye directamente en un comportamiento más dúctil que el suelo sin reforzar (Ibraim y Fourmont, 2006).

A partir de ensayos de tensión y compresión triaxial sobre arenas reforzadas con fibras de polipropileno, para verificar la influencia que la inclusión de fibras tienen en el módulo de deformación, Diambra *et al.* (2010) concluyeron que la rigidez inicial del suelo reforzado no se ve modificada al integrar fibras, más bien que las mismas inician a reaccionar a partir de grandes deformaciones.

La mayor problemática en suelos granulares es su potencial de licuación, a lo que en estudios de Ibraim *et al.* (2010) confirmaron que la adición de fibras en arenas sueltas reduce los problemas de licuación, y los convierte en suelos aprovechables para desplantar estructuras.

Por otro lado en lo relacionado a suelos cohesivos, son escasos los estudios realizados sobre suelos arcillosos reforzados con fibras. Entre ellos vale mencionar la investigación desarrollada por Akbulut *et al.* (2007). Estos autores estudiaron el efecto que fibras sintéticas de polipropileno y polietileno tienen en el comportamiento de un suelo arcilloso. Se observó un claro aumento en los parámetros de resistencia al corte (c y ϕ), siendo más notorio este incremento en el suelo reforzado con fibras de polipropileno. De acuerdo a Kumar *et al.* (2006) en investigación realizada sobre suelos arcillosos reforzados con fibras de poliéster

mostraron que la resistencia a la compresión no confinada (compresión simple) aumenta con el contenido y longitud de fibras.

Por su parte, Gregory (2006) observó que los suelos cohesivos, al igual que con suelos granulares, el incremento en la resistencia al corte del suelo reforzado tiende a un límite asintótico al aumentar el contenido de fibras.

2.5.3.1 Suelos Fibroreforzados para pavimentos

En 1991, el cuerpo de ingenieros del ejército de los estados unidos demostró la mejora del rendimiento de capas de suelos utilizando geofibras de refuerzo en la ingeniería de pavimentos, resultando en un aumento del 33% de la capacidad de resistir el tráfico comparativamente de la sección no reforzada (Tutumluer *et al.*, 2004). Análogamente en posteriores investigaciones se demostró que la inclusión de fibra aumentó el 90% de resistencia al tránsito antes de fallo en una arcilla, y del 60% de una arena limosa (Hazirbaba y Gullu, 2010).

Tingle *et al.* (2002) mediante pruebas de campo a gran escala demostraron que la arena estabilizada con fibra representaba una alternativa viable a los materiales de construcción de carreteras tradicionales de bajo volumen de tránsito.

Hallazgos importantes de algunas investigaciones plantean que el uso de la fibra sintética y/o natural en la construcción de carreteras puede significar un aumento de la resistencia del pavimentos a la deformación permanente, cuando estas mejoran una capa de subbase débil (Chauhan *et al.* 2008).

En la construcción de pavimentos, el refuerzo con fibras podría usarse a los fines de estabilizar una gran variedad de suelos de base o subbase, desde arenas hasta arcillas altamente plásticas (Li, 2005). Diversos investigadores han reportado que el número de ciclos para alcanzar la falla en pruebas de campo sobre pavimentos aumenta al adicionar fibras en la capa de base de su estructura (Grogan and Johnson, 1993; Santoni, *et al.*, 2001)

Los suelos reforzados con fibras han probado ser eficientes en la reparación de fallas en taludes carreteros existentes como así también para la construcción de nuevos taludes (Gregory, 2006). Las fibras a diferencia de los geosintéticos, no requieren de una zona extendida de anclaje para poder desarrollar toda su resistencia, minimizando de esta manera la necesidad de excavaciones.

Gregory (2006) en su tesis doctoral estudió el comportamiento de suelos reforzados con fibras en dos proyectos carreteros ejecutados en los Estados Unidos, el primero la construcción de la autopista “President George Bush Turnpike” en Dallas, Texas, que fue construida en extensa zona de suelos residuales, el reforzamiento consistió en incorporar fibras de polipropileno en la parte superior del terraplén con taludes 4:1, con el fin de prevenir fallas superficiales en el mismo (figura 2.16). El segundo proyecto consistió en la reparación de 2 km lineales de un terraplén que circula a lo largo del lago “Joe Pool” en la ciudad de Grand Prairie, Texas. El terraplén había sido construido en la década del 80 por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos, y estaba conformado por arcillas expansivas. Para el año 2003, las fallas en los taludes del terraplén eran importantes y comenzaron a dañar parte del pavimento. Se adoptó para la reparación del mismo el uso de suelos reforzados con fibras. Para ambos proyectos se utilizaron fibras de polipropileno con un tratamiento de carbono para limitar el daño por los rayos UV de la luz solar.



Figura 2. 15 Terraplén reforzado con fibras de polipropileno en el proyecto “President George Bush Turnpike”

Fuente: Gregory, 2006

2.5.4 Interacción Suelo-Fibra

El efecto de la interacción suelo-fibra es muchas veces comparado con el de las raíces de las plantas que en esencia permiten distribuir los esfuerzos en una superficie mayor de suelo. Consoli *et al.* (2009b) observaron en los resultados de ensayos de plato de carga en arena con y sin refuerzo de fibras, que este refuerzo se traduce en una mejora de la relación carga-asentamiento. Además se reportó que la arena no reforzada desarrolla la falla por punzonamiento, mientras que la arena reforzada con fibras distribuye los esfuerzos en un área mayor, mostrando un cono de depresión en la periferia del plato de carga.

En el interior de la estructura del suelo, las fibras están sometidas a un esfuerzo de tracción, debido al movimiento relativo entre partículas; y un esfuerzo de aplastamiento de los granos de suelo sobre la fibra (Consoli *et al.*, 2005). La fibra comienza a actuar una vez que los granos de suelo se han reacomodado lo suficiente como para producir el anclaje de la fibra. A medida que el suelo se deforma, mayor es la contribución de las fibras a la resistencia del suelo. Este mecanismo de interacción se presenta principalmente en suelos granulares (figura 2.17).

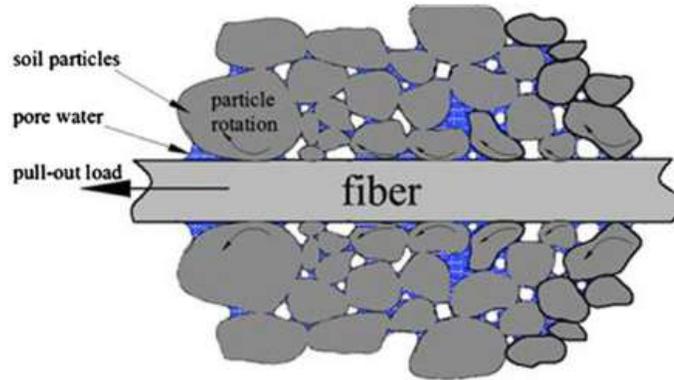


Figura 2. 16 Diagrama de interacciones mecánicas entre partículas de suelo y de fibras

Fuente: Tang *et al.* 2010

Respecto a suelos finos, es poco el conocimiento sobre la interface del suelo-fibra. Se distingue lo realizado por Tang *et al.* (2007), que mediante investigación realizada con microscopio electrónico de barrido o SEM (scanning Electron Microscope) observaron que en la superficie de la fibra se adhieren minerales arcillosos, lo que contribuye a aumentar la resistencia y la fricción entre la fibra y la matriz de suelo (figura 2.18).

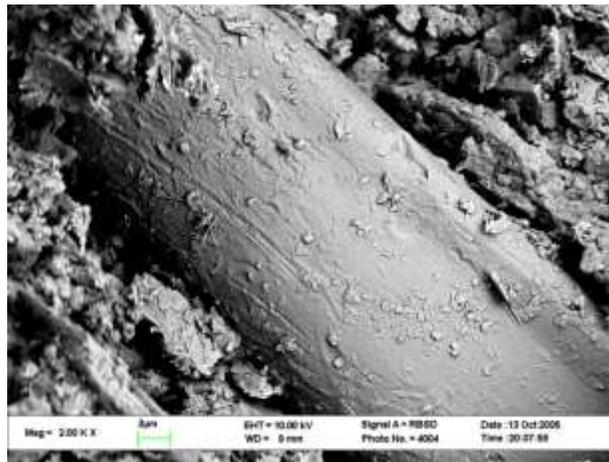


Figura 2. 17 Microfotografía SEM, interfaz suelo-fibra después de la compactación

Fuente: Tang *et al.* 2010

En la figura 2.18 de la interface suelo-fibra después de la compactación se observa como la fibra es empacada y trabada por partículas del suelo. Y Una vez realizada la prueba de extracción (Pull-out test) se percibe claramente como

algunas partículas se quedan unidas a la fibra (figura 2.19). Reflejando que la matriz de la interface es alterada o incluso rota durante el proceso de cizallamiento, en esta etapa la fricción de la interface depende en su mayoría de la resistencia de las partículas del suelo. Lo cual significara que la mayor resistencia al cortante será entre mayor sea el empacamiento y trabazón de las fibras con el suelo (Tang *et al.*, 2010).

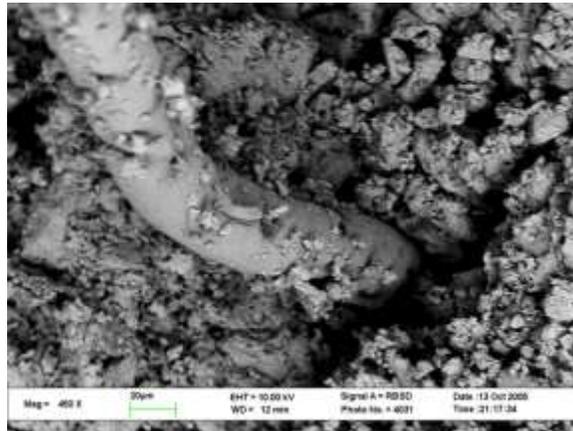


Figura 2. 18 Microfotografía SEM, interfaz suelo-fibra después de la prueba de extracción

Fuente: Tang *et al.* 2010

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

Durante la compactación, algunas partículas duras angulares (por ejemplo arenas) en el suelo pueden causar deformación plástica del cuerpo de fibras (figura 2.20) especialmente por la alta energía de compactación. Lo que resulta en un aumento tanto de la rugosidad de la superficie de las fibras y la resistencia al deslizamiento en el suelo (Tang *et al.*, 2007).

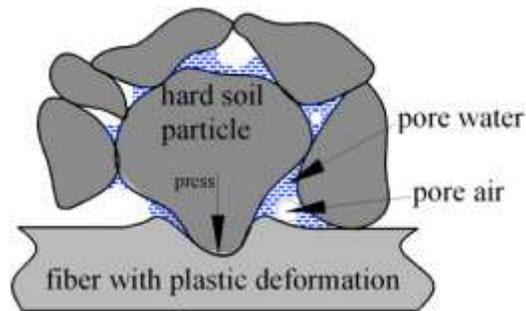


Figura 2. 19 Diagrama de la condición de contacto entre las partículas de suelo duro y la superficie de la fibra.

Fuente: Tang et al. (2010)

El contenido de agua juega un papel clave en la resistencia al deslizamiento de la interfaz suelo-fibra. La resistencia pico y residual de la interfaz disminuyen a medida que aumenta el contenido de agua. Puede ser debido a que el aumento del agua disminuye la fuerza capilar (succión matricia) y el esfuerzo efectivo entre las partículas (Fredlund y Rahardjo, 1993). Así mismo el agua tiene influencia importante como capa lubricante de la interfaz, por lo tanto un aumento en su contenido, resulta en una disminución de la fricción que facilitara la rotación de partículas, y extracción de las mismas, provocando una disminución de la resistencia mecánica del compuesto.

En resultados de investigaciones realizadas por (Lopes y Ladeira, 1996; Beyerlein *et al.* 2001; Brandstetter *et al.* 2005; Li *et al.* 2005), muestran que la resistencia a la extracción está influenciada por muchos factores, como pueden ser, el esfuerzo de confinamiento, densidad seca del suelo, velocidad de desplazamiento, la longitud del refuerzo, rugosidad y forma de la superficie del refuerzo, entre otros.

La importancia del estudio de la resistencia a la tensión del suelo es básicamente a que no se tiene un análisis del mismo en la práctica actual de la ingeniería comparativamente con parámetros como la resistencia al corte o de compresión. Es común encontrar que los valores de tensión del suelo se asumen como cero dado su bajo valor. Aunado a esto se encuentra la dificultad de medir con precisión la resistencia a tensión de un suelo mediante técnicas de laboratorio satisfactorias.

2.6 Diseño de Pavimentos

Un importante cambio han experimentado las carreteras mexicanas desde su concepción hasta el momento actual, un enorme crecimiento del volumen de transporte nacional en número y peso de los vehículos presentan nuevas condiciones por afrontar, que deben de ser consideradas por los actuales diseñadores y constructores de futuros pavimentos asfálticos. La vida útil de un pavimento será entonces el resultado de la interacción de diversos factores que intervienen en el diseño de pavimentos (figura 2.21), que aunado al proceso constructivo y trabajos de mantenimiento contribuirán al éxito o fracaso del mismo, pero siempre en búsqueda de solventar las necesidades de las carreteras de nuestra época (Rico *et al.*, 1998).



Figura 2. 20 Factores que afectan el diseño de pavimentos

Fuente: Garnica y Hernández, 2013

Las metodologías de diseño de pavimentos flexibles son generalmente de carácter empírico o mecánico–empíricas. La figura 2.22 describe la evolución de los métodos de análisis estructural y diseño de pavimento e identifica la situación actual en la que nos encontramos al respecto. Los métodos más utilizados aun en la práctica actual son los básicamente considerados como empíricos, siendo resultado casi en su totalidad por la experiencia encontrada de la observación de pruebas y mediciones practicas insitu y para condiciones muy específicas, en

donde el diseño principalmente se respalda en propiedades físicas de los materiales y algún índice de resistencia como lo es el valor relativo de soporte (VRS) o también denominado California Bearing Ratio (CBR). Algunas metodologías consideradas de regresión de resultados de tramos de prueba como el método AASHTO, se considera de igual forma empírico porque su aplicación finalmente está estrictamente limitada a las condiciones que se utilizaron para su calibración. Importante también es resaltar que ya se manejan conceptos mecanicistas como el Modulo de Resiliencia (MR), pero sólo como parámetro de cálculo que se encuentra correlacionando el valor VRS, y no del resultado de ensayos que lo identifiquen como una propiedad fundamental del material. En el mejor de los casos, existen métodos de diseño que se les llama semiempíricos, o empírico-mecanicistas, porque consideran leyes de fatiga de los materiales en los cálculos de vida útil, algunos de los métodos que cumplen este enfoque son el método Shell o el del Instituto Norteamericano del Asfalto, o bien en nuestro país el desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMTPave), todo estos con la visión clara de tender hacia un enfoque puramente mecanicista (Garnica y Correa, 2004).



Figura 2. 21 Esquema para ilustrar donde estamos en cuanto a métodos de análisis y diseño de pavimentos.

Fuente: Garnica y Correa, 2004

En el caso de los métodos empíricos se correlaciona el comportamiento de los pavimentos in situ, a través de observaciones y mediciones de campo, con los factores que causan los mecanismos de degradación en estas estructuras (figura 2.21). Los factores más importantes son las cargas impuestas por el tránsito, las condiciones ambientales (principalmente temperatura y precipitación) a las cuales se encuentra sometida la estructura, el tipo de suelo o terreno de desplante (subrasante), la calidad de los materiales empleados y deficiencias durante el proceso constructivo. Todos estos factores son controlados y medidos durante las fases de estudio para correlacionarlos con los mecanismos de degradación y crear así el método de diseño (Quintana y Reyes, 2007).

Dos son los mecanismos principales de degradación que se intentan controlar tanto en las metodologías empíricas como en las mecanicistas: fatiga y exceso de deformación permanente. La fatiga ocurre en las capas ligadas, y para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores altos de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica. Este tipo de deformación es asociado a la respuesta resiliente que presenta la estructura cuando se mueven las cargas vehiculares. La deformación permanente es la deformación vertical residual que se va acumulando debido al paso de los vehículos la cual puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento.

Las metodologías mecanicistas pretenden tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento, ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Esto es, un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen, y se pueden determinar en laboratorio o en campo (Garnica y Correa, 2004).

Esta metodología nos permitiría la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y, por ende, aumentar en gran medida la confiabilidad de nuestros diseños.

2.6.1 Metodología Empírica (UNAM-DISPAV)

Desde hace aproximadamente cuatro décadas (1974), los proyectistas de carreteras han contado en México con un método de diseño para pavimentos desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, a petición de la entonces Secretaría de Obras Públicas, luego SAHOP y ahora SCT. Este método partió del análisis de datos experimentales en tramos de prueba, en carreteras en servicio, de investigación teórica y de experimentación en laboratorio en la pista circular de pruebas, que influyó más recientemente en sucesivos perfeccionamientos (Rico *et al.* 1998).

Con los datos experimentales de la pista de prueba y tramos de prueba, se desarrolló el método de diseño de pavimentos (figura 2.23).

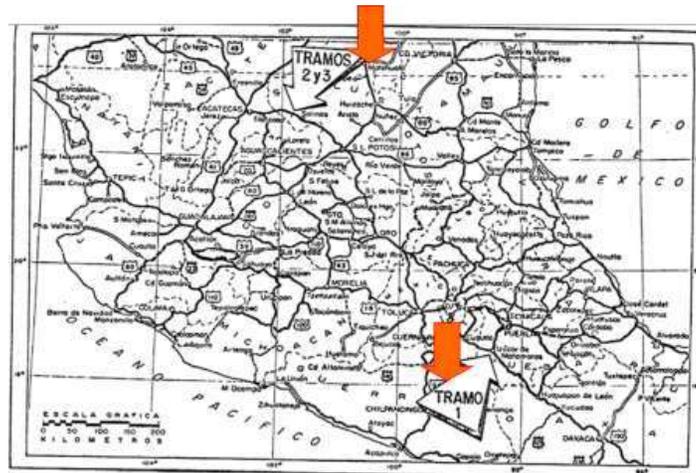


Figura 2. 22 Tramos de Prueba, Instituto de Ingeniería de la UNAM, 1962

Fuente: Corro, 1970

Procedimiento de diseño para el Método de la UNAM (Rico *et al.*, 1998):

- Convertir el tránsito mezclado a número de ejes equivalentes
- Con los valores de valor relativo de soporte entrar a las gráficas de diseño de espesores
- Determinar los espesores de las capas
- Determinar el espesor de la base y la carpeta tomando en cuenta espesores mínimos de carpeta.

Este método considera como datos de entrada básicos el tipo de carretera, el número de carriles, la vida de proyecto, el tránsito diario promedio anual (TDPA), tasa de crecimiento y variables adicionales sobre características del terreno y materiales, así como de climas, nivel freático y precipitación pluvial. Como guía para el proyectista, se recomienda la estimación de un Valor Relativo de Soporte crítico (VRS) para las condiciones (Rico *et al.*, 1998).

Para simplificar el empleo del método de diseño se utiliza un programa interactivo de cómputo, DISPAV-5 Diseño de Pavimentos, empleando secciones estructurales hasta de cinco capas, lo cual simplifica mucho el empleo del método de diseño ya que incorpora tanto el cálculo por deformación permanente, en el modelo elasto-plástico, como el cálculo por fatiga empleando modelos elásticos multicapa (Rico *et al.*, 1998).

El DISPAV-5 (figura 2.24) es un programa de tipo interactivo que permite calcular tanto carreteras de altas especificaciones como carreteras normales. Su fundamento es teórico-experimental, y para su aplicación se emplean conceptos y métodos de cálculo mecanicistas (Corro y Prado, 1999)



Figura 2. 23 Software DISPAV-5 para diseño de pavimentos con la metodología UNAM
Desarrollo

- Diseño por deformación
- Revisión del diseño por fatiga
- Si no satisface se modifica

Nivel de confianza; Esto se refiere a la probabilidad de que el pavimento dure al menos para el número de años para el que se proyectó. Se recomienda 85 %.

2.6.2 Metodología Empírico-Mecanicista (IMT-PAVE)

El IMT-PAVE (figura 2.25) es una herramienta informática para el diseño de pavimentos mediante una metodología empírico-mecanicista que, sin descuidar otros factores, pone un énfasis en el concepto de espectro de carga para relacionarlo con el de espectro de daño, a través del análisis de esfuerzos y deformaciones en la estructura de pavimento y su correlación con los principales tipos de deterioros que presenta (figura 2.26) (Garnica y Hernández, 2013)



Figura 2. 24 Pantalla de bienvenida del IMT-PAVE 1.2

Las metodologías empírico-mecanicistas pretenden tener un enfoque más científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento, ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Esto es, un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen, ya que se pueden determinar en laboratorio o en campo. Esta metodología permitiría la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y, por ende, aumentar en gran medida la confiabilidad del diseño. Las componentes

de entrada al proceso de diseño se refieren a la geometría de la estructura, básicamente son los espesores de cada capa, las propiedades de los materiales que conforman cada una de esas capas que serán módulos dinámicos o resilientes y el nivel de tránsito vehicular definido por su espectro de distribución de cargas. La selección del diseño inicial consiste en una primera estimación de valores para esas componentes de entrada. (Garnica y Hernández, 2013).

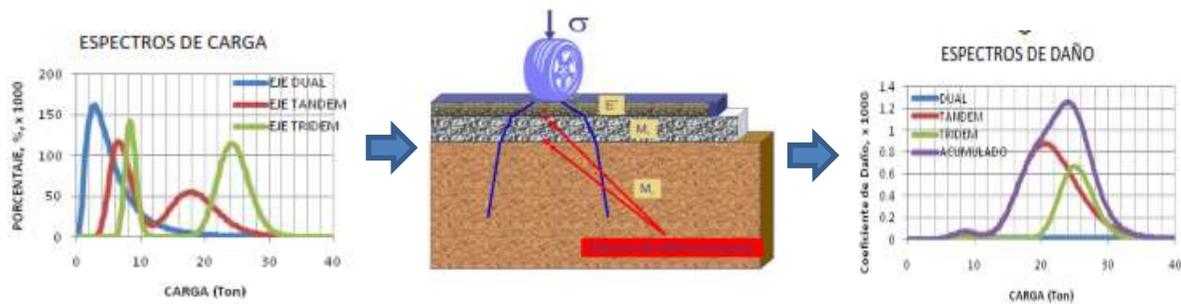


Figura 2. 25 Esquema del proceso de transición entre el espectro de carga –espectro de daño.

Fuente: Garnica, 2012

Definido el diseño inicial, se procede al cálculo de las respuestas estructurales en la sección estructural del pavimento. Estas respuestas estructurales consisten en conocer la distribución de esfuerzos (σ), deformaciones unitarias (ϵ) y deflexiones (δ). El cálculo se realiza básicamente considerando al pavimento como un medio multicapas, en donde el comportamiento de los materiales se apoya en la Teoría de la Elasticidad, con simplificaciones necesarias para su cálculo más eficiente. A partir de la respuesta estructural en el pavimento se calcula el nivel de daño esperado en el período de diseño, para los dos tipos de deterioro principales que se presentarán. Estos son agrietamientos por fatiga y deformaciones permanentes. Calculados los niveles de deterioro para el período de diseño, se introduce el concepto de vida remanente, el cual es el inverso del daño acumulado en el periodo de diseño y determinará cuando una sección ha excedido o no el valor máximo de daño acumulado. Como fue expresado

anteriormente, la idea fundamental es la de poder garantizar el desempeño del pavimento a lo largo de su vida de proyecto. Esto significa garantizar que los niveles de agrietamiento y de deformación permanente, se mantendrán dentro de un rango ideal, que dependerá de la importancia de la red carretera de que se trate (Garnica y Hernández, 2013).

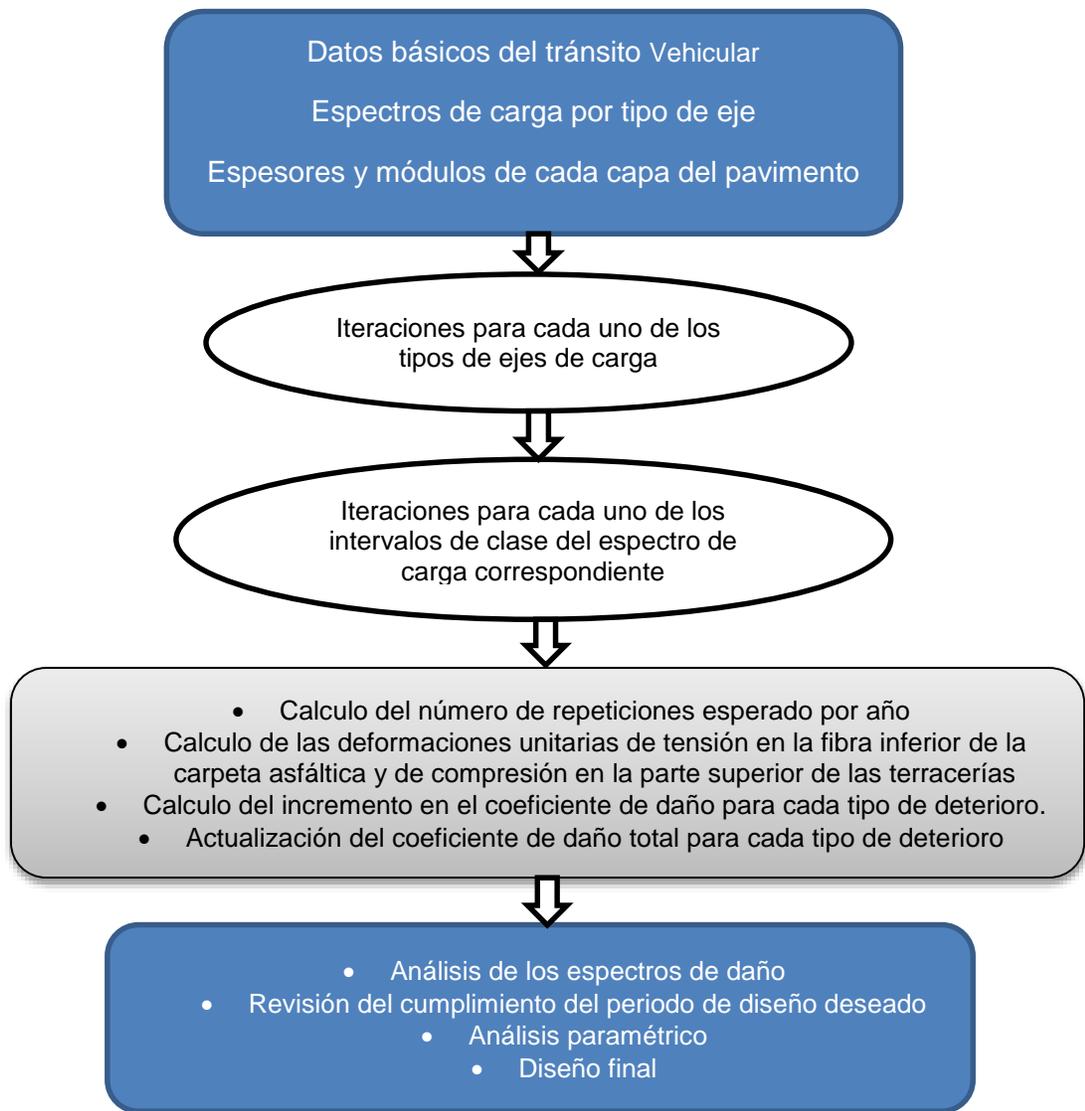


Figura 2. 26 Diagrama de flujo general para el cálculo de los espectros de Daño

Fuente: (Garnica y Hernández, 2013)

Para la obtención de los espectros de daño (figura 2.27), se necesita el concepto de daño definido por Miner, 1945, en donde para cada tipo de eje (i), y cada nivel de carga, (j), se obtiene el cociente entre el número de repeticiones correspondiente esperado por año (n), y el número de repeticiones admisibles (N), para limitar el desarrollo de un cierto tipo de deterioro. El daño total se calcula con la ecuación:

$$D = \sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{N_{ij}}$$

El coeficiente de Daño, D, así obtenido, está asociado a un cierto tipo de deterioro en el pavimento, como los que se muestran en la figura 2.28. El inverso de D representa el tiempo, T (en años), en que se alcanzará el número de repeticiones admisible de ese deterioro y es el que se debe comparar con el período de diseño deseado (usualmente 20 años en pavimentos asfálticos).



Figura 2. 27 Tipos de deterioro comunes en pavimentos asfálticos

a) Fatiga b) Deformación permanente en capas inferiores

Fuente: Garnica y Hernández, 2013

2.6.3 Módulo de Resiliencia

Los pavimentos que conforman las vías terrestres están sometidos a cargas repetitivas impuestas por los vehículos consideradas como cargas dinámicas de corta duración, mismas que llevan a la fatiga de la estructura del pavimento en un periodo de tiempo, que aunado a las propiedades de los materiales (geomecánicas y dinámicas). Sin embargo los diseños de pavimentos se han realizado bajo la aplicación de cargas estáticas a la falla de la estructura, sometida ésta a ensayos de carga axial, como es el CBR o a ensayos de placa con carga repetida o estática, realizados directamente sobre la subrasante y en ocasiones sobre toda o parte de la estructura. En este último caso se tiene un modelo más próximo a lo que serían las cargas cíclicas en períodos largos (Vidal y Osorio, 2002).

La reacción de un material cuando la carga es retirada, es recuperar parte de la deformación inducida; la capacidad de recuperación de dicho material es lo que comúnmente se denomina la resiliencia de los materiales. La relación entre el esfuerzo desviador y la correspondiente deformación unitaria recuperada se denomina módulo resiliente. La resiliencia en los suelos se entiende como la capacidad que tienen éstos para recuperarse después de una sollicitación de carga, cuando se trabajan bajo deformaciones en una zona elástica supuesta.

Hveem y Carmany (1948) reconocieron que el módulo dinámico de elasticidad para subrasantes es un parámetro de gran importancia para entender el agrietamiento (por fatiga) de las superficies de asfalto y que la carga monotónica podría no ser la adecuada para su determinación. En 1955, Hveem desarrolló el tema “comportamiento resiliente de los pavimentos”. El propuso la prueba del estabilómetro para caracterizar a las subrasantes. Seed y sus colegas de la Universidad de California siguieron lo establecido por Hveem. Desarrollaron pruebas de carga repetida e introdujeron el término de módulo de resiliencia (Seed *et al.*, 1955). Este término fue cambiado más tarde por el de módulo resiliente (Seed *et al.*, 1962), el cual fue definido como la magnitud del esfuerzo desviador

repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable y se representa como sigue:

$$Mr = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\epsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}}$$

Donde:

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_3 = Esfuerzo principal menor

σ_d = Esfuerzo desviador

ϵ_{axial} = Deformación recuperable

Durante pruebas de carga repetida se observa que después de un cierto número de ciclos de carga, el módulo llega a ser aproximadamente constante y la respuesta del suelo puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama **módulo de resiliencia** (Figura 2.29). Este concepto aplica tanto para suelos finos como para materiales granulares. Así entonces, el concepto de módulo de resiliencia está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida (Garnica *et al.*, 2000).

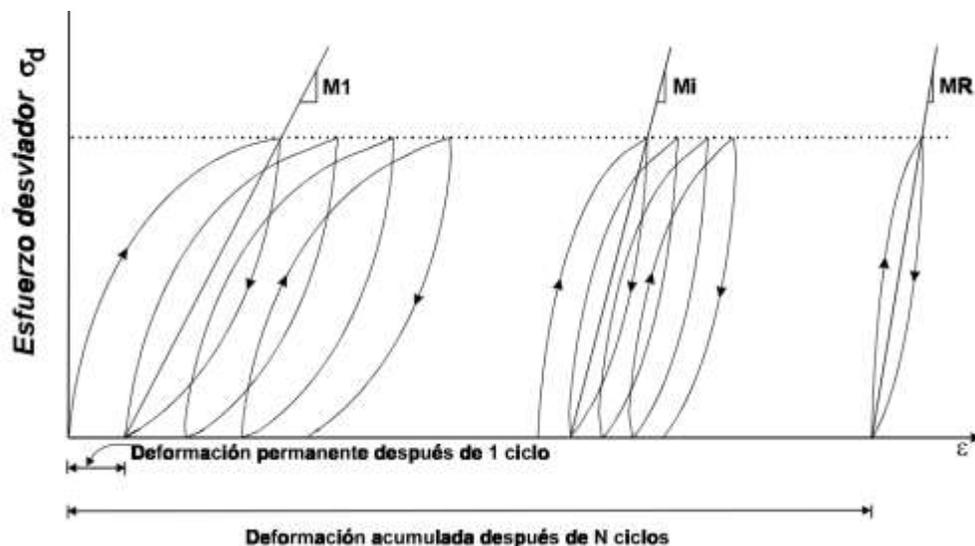


Figura 2. 28 Ciclos de carga para llegar al módulo resiliente

Fuente: Garnica *et al.* 2000

2.6.3.1 Valores típicos de módulo de resiliencia

La tabla 2.5 proporciona valores típicos de módulo de resiliencia y otras características, para diferentes tipos de suelos susceptibles de usarse en la construcción de terracerías y capas granulares de pavimentos.

Tabla 2.5 Valores de módulo de resiliencia y otras características

Tipo de suelo AASHTO	Descripción	SUCS	γ_d (kN/m ³)	VRS (%)	Valor K (Mpa/m)	Módulo resiliente (Mpa)
Suelos de grano grueso						
A-1-a , bien graduado	Grava	GW, GP	19.6 – 22	60 – 80	81.44 – 122.16	70.37 – 140.74
A-1-a , mal graduado			18.9 – 20.4	35 – 60	81.44 – 108.58	70.37 – 140.74
A-1-b	Arena gruesa	SW	17.3 – 20.4	20 – 40	54.29 – 108.58	42.23 – 105.55
A-3	Arena fina	SP	16.5 – 18.9	15 – 25	40.72 – 81.44	35.18 – 14.07
Suelos A-2 (Materiales granulares con alto porcentaje de finos)						
A-2-4 , gravosa	Grava limosa	GM	20.4 – 22.8	40 – 80	81.44 – 135.73	70.37 – 211.11
A-2-5 , gravosa	Grava areno limosa					
A-2-4 , arenosa	Arena limosa	SM	18.9 – 21.2	20 – 40	81.44 – 108.58	70.37 – 140.74
A-2-5. arenosa	Arena limosa con grava					
A-2-6 , gravosa	Grava arcillosa	GC	18.9 – 22.0	20 – 40	54.29 – 122.16	56.29 – 140.74
A-2-7 , gravosa	Grava arcillosa con arena					
A-2-6 , arenosa	Arena arcillosa	SC	16.5 – 20.4	10 – 20	40.72 – 95.00	35.18 – 105.55
A-2-7 , arenosa	Arena arcillosa con grava					
Suelos de grano fino						
A-4	Limo	ML,OL	14.1 – 16.5	4 – 8	6.79 – 44.79	14.07 – 42.22
	Grava-arena-limo		15.7 – 19.6	5 – 15	10.86 – 59.72	28.14 – 56.29
A-5	Limo alta compresibilidad	MH	12.6 – 15.7	4 – 8	6.79 – 51.58	14.07 – 42.22
A-6	Arcilla plástica	CL	15.7 – 19.6	5 – 15	6.79 – 69.22	14.07 – 70.37
A-7-5	Arcilla baja compresibilidad	CL, OL	14.1 – 19.6	4 – 15	6.79 – 58.36	14.07 – 70.37
A-7-6	Arcilla alta compresibilidad	CH, OH	12.6 – 17.3	3 – 5	10.86 – 59.73	28.14 – 70.37

Fuente: Garnica et al. 2000

Para las capas de base, subbase y subrasante se considera que los valores mínimos de Mr son los que se indican en la tabla 2.6 siguiente:

Tabla 2.6 Módulos Resilientes de bases, subbases y subrasantes

Módulos Resilientes, kg/cm²

BH	BEA	SB	SR
≥3,000	≥30,000	≥2,000	≥1,200
<i>BH= Base Hidráulica , BEA= Base con Asfalto, SB= Subbase, SR= Subrasante</i>			

Fuente: DGST, 2010

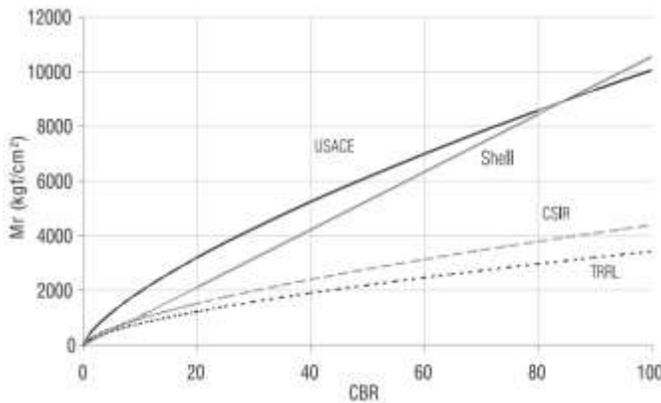
Los equipos que se requieren para determinar el módulo resiliente son de un alto costo, debido a la instrumentación de alta tecnología que poseen; razón por la cual en nuestro medio se realizan poco estos ensayos, además se debe tener en cuenta que muy pocas instituciones poseen estos equipos, es por esto que aún se sigue diseñando con métodos tradicionales o con correlaciones entre valores dinámicos y estáticos aplicados a los métodos que utilizan dicho valor.

2.6.3.2 Correlación de Capacidad Portante (VRS/CBR) – Modulo de Resiliencia

Para el diseño de los espesores de una sección estructural del pavimento flexible, los métodos consideran como parámetro fundamental, dentro de la evaluación de los materiales, la obtención del Módulo de Resiliencia (Mr). Sin embargo, reconocen que no todos los organismos o dependencias tienen el equipo adecuado para llevar a cabo tal prueba, por lo que han establecido factores de correlación entre Mr y la prueba estándar de Valor Relativo de Soporte (T-193 de AASHTO). Señalan que los resultados son bastante aproximados, sin embargo para un diseño preciso, se recomienda llevar a cabo la prueba del Módulo de Resiliencia para la capa del pavimento analizada (Garnica *et al.* 2000).

Muchos investigadores se han preocupado por establecer correlaciones del módulo resiliente con otros ensayos utilizados normalmente en el diseño de los espesores de la estructura de pavimentos. Dentro de éstas, la más utilizada ha sido la correlación con el CBR (Vidal y Osorio, 2002).

A continuación se presentan algunas correlaciones empíricas entre el CBR y el valor del módulo resiliente. En la figura 2.30 se esquematizan las mismas.



- Shell (Heukelomm y Foster 1960)
Mr (psi) = 1500 CBR
- U.S. Cuerpos de Ingenieros (USACE) (Green y Hall 1975)
Mr (psi) = 5409 CBR^{0.711}
- Concilio Sur Africano de Investigaciones Científicas e Industriales (CSIR)
Mr (psi) = 3000 CBR^{0.65}
- Laboratorio de Investigaciones de Transporte y Carreteras (TRRL) (Lister 1987)
Mr (psi) = 2555 CBR^{0.64}

Figura 2. 29 Correlaciones CBR – Mr

Fuente: Vidal y Osorio, 2002

Shell, CSIR y TRRL presentan una modificación a las anteriores correlaciones, teniendo en cuenta el número de ejes equivalentes (N) de 8,2 toneladas durante el período de diseño, tal como se muestra en la tabla 2.7. Es importante destacar que la representación de las ecuaciones tiene la siguiente forma : $Mr = K \cdot CBR^n$, donde K varía con el valor de N (Vidal y Osorio, 2002)

Tabla 2.7 Valor recomendado de K para diferentes cantidades de ejes equivalentes

Proponente	Valor recomendado de K para diferentes N			
	1×10^5	1×10^6	1×10^7	5×10^7
Shell $Mr = K \cdot CBR$	1500	1750	2300	2900
CSIR $Mr = K \cdot CBR^{0.65}$	3200	3700	4700	5800
TRRL $Mr = K \cdot CBR^{0.64}$	3250	3800	4800	5900

3. METODOLOGIA

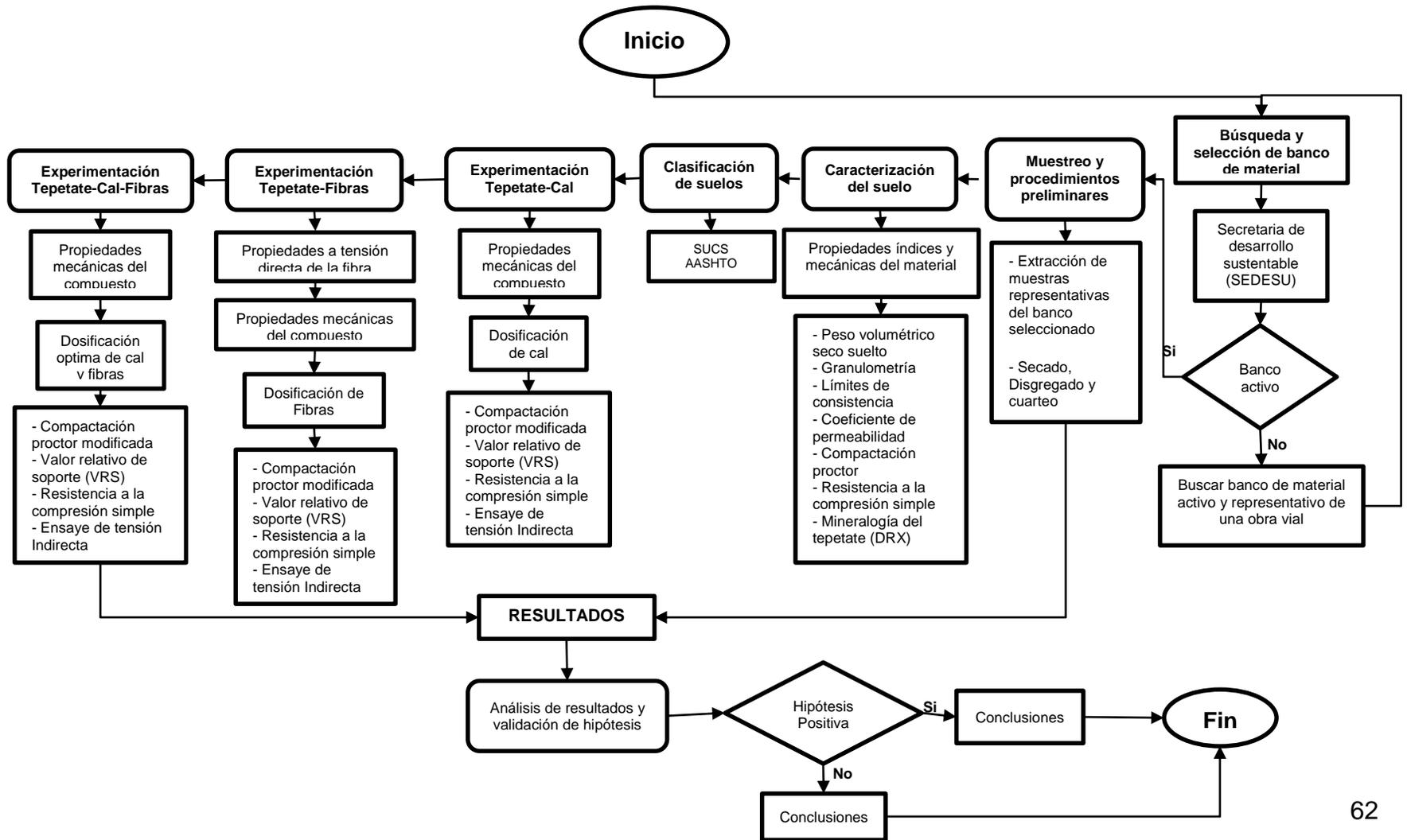


Figura 3. 1 Diagrama descriptivo de la metodología

3.1 Búsqueda y selección de banco de material

Dado que el objetivo central es utilizar el suelo natural denominado tepetate, para realizar un mejoramiento de sus propiedades, la primera actividad será localizar los bancos de extracción de este material, siempre tratando de localizar los bancos activos, y a manera representativa que su aprovechamiento este enfocado a una obra vial, para lo cual se solicitó apoyo a la Secretaria de Desarrollo Sustentable (SEDESU) dependencia gubernamental que cuenta con los registros de la zonas que fueron y actualmente están destinadas a su explotación, así como con apoyo de la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) dependencia que libera los permisos de los lugares para ser explotados como bancos de material, información que será muy útil para localizar los puntos de extracción, una vez realizada las labores para encontrar el recurso principal de la investigación se continuara con las etapas subsecuentes de experimentación en laboratorio.

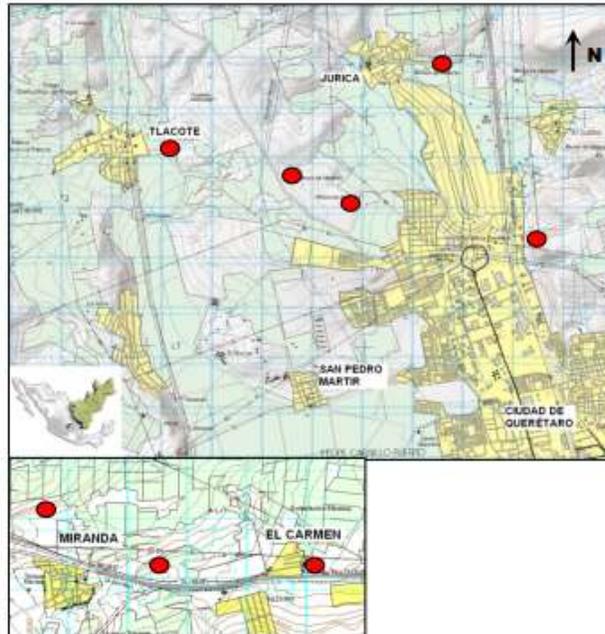


Figura 3. 2 Ubicación de algunos bancos de tepetate en la ciudad de Querétaro

Fuente: Rosales, 2011

3.2 Muestreo y procedimientos preliminares

3.2.1 Muestreo

Para la realización del trabajo fue necesaria la extracción de muestras representativas del banco seleccionado previamente según los criterios establecidos en los métodos de muestreo y prueba de materiales M-MMP-1-01/03 “Muestreo de materiales para terracerías”. Del banco se extrajo la cantidad aproximada de 200 kg, depositados en bolsas para conservar la humedad natural, Estas muestras se trasladaron a las instalaciones del laboratorio de Mecánica de Suelos y Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería, lugar donde se realizaron todas las pruebas necesarias para la investigación. Para la realización de cada prueba se efectuaron los procedimientos descritos en el siguiente subcapítulo Procedimientos previos.

3.2.2 Procedimientos Preliminares

Previo a obtener las propiedades índices y mecánicas del material extraído, se realiza los procedimientos preliminares que permiten la preparación de la muestra representativas mediante su secado, disgregado y cuarteo, con el propósito de obtener las proporciones representativas para efectuar las pruebas de laboratorio necesarias, de acuerdo a la normativa M-MMP-1-03/03 “secado, disgregado y cuarteo de muestras.

3.2.2.1 Secado

El secado se realiza con el objeto de facilitar la disgregación y manejo de las muestras, cuando su contenido de agua es tal que no se puede disgregar fácilmente el material o la misma humedad de este impide la realización de las pruebas. Se extiende la muestra sobre charolas o en una superficie horizontal, lisa y limpia y se seca a temperatura ambiente. Si se utiliza un horno este no debe mantener una temperatura de $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

3.2.2.2 *Disgregado*

Se realiza con el objeto de separar las diferentes partículas aglomeradas que constituyen la muestra. Esta operación es relativamente fácil si se trata de materiales granulares con pocos finos y poco plásticos. La disgregación de la muestra se efectuará sin romper las partículas duras, llevándose a un grado tal que permita reproducir en lo posible las condiciones de utilización del material en el campo. Se disgrega utilizando un mazo de madera de forma prismática rectangular con masa aproximada de 1kg, aplicando golpes verticalmente desde una altura aproximada de 20 cm hasta obtener partículas que ya no sean disgregables.

3.2.2.3 *Cuarteo*

Para la realización de toda prueba de laboratorio es necesario realizar un cuarteo, con el propósito de obtener porciones representativas. El cuarteo se puede realizar mediante un procedimiento manual o mediante la ayuda de un cuarteador mecánico. Para el procedimiento manual primeramente se debe mezclar todo el material hasta que presente un aspecto homogéneo, esto se logra traspaleándolo de un lugar a otro aproximadamente 4 veces, en una superficie horizontal y limpia. Una vez homogeneizada la muestra, se forma un cono, depositando con la pala el material en el vértice del mismo, para que se acomode por sí solo.

Se forma un cono truncado, encajando la pala en el vértice del cono original y haciéndola girar alrededor de su eje con el fin de ir desalojando el material hacia la periferia, hasta dejarlo con una altura de 15 a 20 cm

Enseguida, el cono truncado se separa en cuadrantes aproximadamente iguales con la ayuda de una regla de madera de dimensiones adecuadas al volumen de la muestra, se junta material de dos cuadrantes opuestos, las veces necesarias para obtener la porción del tamaño requerido para la prueba

3.3 Caracterización del suelo

Entendiendo como caracterización de suelos, a la identificación de un material a partir del estudio de sus propiedades físicas, químicas, estructurales, etc. Existiendo para ello distintas técnicas de caracterización, de acuerdo al interés que despierte dicho material, una vez conocidas sus propiedades puede establecerse la naturaleza del mismo, así como sus posibles aplicaciones.

Para propósitos de esta investigación la caracterización del material tepetate, se realizara mediante la determinación de sus propiedades índice y mecánicas. La Tabla 3.1 sugerida por Rico y Del Castillo, (1982) propone distintas pruebas que se deben realizar a los suelos extraídos para su utilización en las vías terrestres.

Tabla 3.1 Pruebas de laboratorio que se efectúan a los suelos que se extraen de bancos, según su utilización

Proceso	Terracerías	Subrasante	Base y Subbase	Carpeta Asfáltica
Clasificación	<ul style="list-style-type: none"> Límites de plasticidad. Granulometría 	<ul style="list-style-type: none"> Límites de plasticidad. Granulometría 	<ul style="list-style-type: none"> Límites de plasticidad. Granulometría 	<ul style="list-style-type: none"> Límites de plasticidad. Granulometría
Calidad	<ul style="list-style-type: none"> Peso volumétrico máximo. A veces, Valor Relativo de Soporte 	<ul style="list-style-type: none"> Peso volumétrico máximo. Valor Relativo de Soporte. Expansión. Equivalente de Arena 	<ul style="list-style-type: none"> Peso volumétrico máximo. Valor Relativo de Soporte. Expansión. Equivalente de Arena 	<ul style="list-style-type: none"> Pruebas de desgaste y/o alterabilidad. Afinidad con el Asfalto. Expansión Equivalente de Arena Pruebas para definir las formas de los agregados.
Diseño		Determinación de VRS o bien: Pruebas de Hveem, o bien Pruebas Triaxiales de Texas	Realizar pruebas indicadas para subrasante	<ul style="list-style-type: none"> Pruebas de Marshall o bien. Pruebas de Hveem Método de C.K.E.

En base a lo anterior la caracterización geotécnica del tepetate consistió en la evaluación de las siguientes propiedades índice y mecánicas del material, realizadas mediante la normativa correspondiente a la American Society for Testing and Materials (ASTM) mediante las siguientes pruebas de laboratorio:

- Peso volumétrico Seco Suelto (Volumen que considera el peso ocupado por el material y los vacíos entre sus partículas), ASTM C 29.
- Granulometría (Tamaño de partícula de los agregados), ASTM C136-05.
- Límite líquido, límite plástico e índice plástico (Determinación de la plasticidad del material, cambios volumétricos), ASTM D4318.
- Compactación Proctor Estándar (determinar la mejor relación humedad-densidad de suelos, para garantizar una mejor resistencia del suelo), ASTM D698.
- Resistencia a la compresión simple (Valor de resistencia del material), ASTM D2166-98.
- Coeficiente de permeabilidad (Define la velocidad del agua a través del material), ASTM D2434-68.
- Análisis de Difracción de Rayos X (Mineralogía del suelo).

Las pruebas se realizaron en el mismo orden que se describe, siendo necesario especificar que para la determinación de la resistencia a compresión simple y el coeficiente de permeabilidad, se trabajó con material que cumpliera tanto el peso específico máximo como la humedad óptima de la prueba Proctor Estándar.

3.4 Clasificación del suelo

Se aprovechara los datos obtenidos en la caracterización de los suelos, para realizar una clasificación del tepetate de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) normado en la ASTM D 2487-00, y la clasificación de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO) normado en la ASTM D-3282, misma que tiene mayor enfoque a las vías terrestres en especial a las carreteras.

3.5 Experimentación Tepetate-Cal

De acuerdo a investigaciones de López Lara (2012), se determinó que las mayores propiedades de resistencia en un tepetate se obtienen con valores aproximados al 10% de cal, por lo cual y derivado de la similitud de la granulometría del banco que arrojó dichos resultados a los del banco propio de esta investigación, se inició la mezcla a partir de esta dosificación óptima en un rango de 10 ± 2 .

Por lo que se realizó un análisis con dosificaciones de 8%, 10% y 12% de cantidad de cal respecto al peso seco del tepetate, a las edades de 14, 28, y 60 días, verificando su influencia en las características mecánicas por medio de pruebas de laboratorio específicas. Se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio para medir la influencia de la cal en las características mecánicas del compuesto.

- Compactación proctor modificada, ASTM D 1557.
- Valor relativo de soporte (VRS), ASTM D1883-99.
- Resistencia a la compresión simple, ASTM D2166-98.
- Resistencia a la tracción indirecta, ASTM C496

La elección de la cal a utilizar en la presente investigación se realizó con apego al análisis del marco teórico planteado, en el cual se evidencia que la cal que proporcionara mejores resultados para un tratamiento de suelos, será la cal

cálcica (CL) con un contenido mínimo de 90% de Oxido de Calcio y Magnesio, en forma de cal hidratada, quedando definida como CL 90-S.

3.6 Experimentación Tepetate-Fibras

De las fibras de refuerzo estudiadas se concluyó que la opción de mayor factibilidad para utilizarse en el tepetate, es lo relacionado a las fibras artificiales y/o sintéticas, en donde se encontró que una opción eficaz, innovadora y económica es la de utilizar fibras de residuo producto de procesos industriales, en este caso se utilizaran fibras metálicas de acero (rebabas) producto de los procesos de tormación de piezas metálicas, las cuales se proporcionaron sin costo alguno para el proceso de investigación. Estas son fibras que proporcionan la resistencia a la tracción deseada, mediante un fácil traslado y colocación o mezclado.

Se hicieron mezclas con dosificaciones de 4%, 6%, 8% y 10% de cantidad de fibra, respecto al peso seco de tepetate, este planteamiento se derivó de un análisis técnico y económico, es decir se delimito a ese intervalo, ya que considerar dosificaciones inferiores a 4% resultaría técnicamente inviable considerando que son fibras metálicas con un peso en masa mayor respecto a otro tipo de fibras, que reflejaría cantidades muy pequeñas de fibras incluidas a la mezcla y no proporcionaría una interacción eficaz suelo-fibra, ni una distribución aleatoriamente uniforme. Así mismo buscar dosificaciones mayores al 10% resultaría económicamente desfavorable, ya que si bien las fibras son producto de residuo, los precios de traslados en volumen reflejarían costos altos para la obtención de la mezcla, aunado a que el efecto de la interacción del suelo-fibra llegado a un límite de dosificación, tendera a ser asintótico.

Se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio para medir la influencia de las fibras en las características mecánicas del compuesto.

- Resistencia a la tracción directa de la fibra, ASTM D 882.
- Compactación proctor modificada, ASTM D 1557.
- Valor relativo de soporte (VRS), ASTM D1883-99.
- Resistencia a la compresión simple, ASTM D2166-98.
- Resistencia a la tracción indirecta, ASTM C496

3.7 Experimentación Tepetate-Cal-Fibras

De acuerdo a las dosificaciones optimas en las etapas anteriores, es decir las que proporcionen incrementos significativos en las propiedades mecánicas medidas con los ensayos de laboratorio, serán la base para continuar con la mezcla final de Tepetate-Cal-Fibras, considerando la cantidad optima de cal y de fibras, para verificar la influencia que representan la interacción con el tepetate, así como las propiedades mecánicas del nuevo compuesto obtenido. Las pruebas de laboratorio utilizadas son las mismas que se utilizaron en las anteriores etapas de experimentación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Selección de banco de material y muestreo

El banco seleccionado se encuentra en el municipio de El Marqués, Qro, en la coordenadas geográficas $20^{\circ}39'4.89''N$ latitud y $100^{\circ}16'27.29''O$, a altura sobre el nivel del mar de 1 850 mts, en un predio conocido como “El Rosario”, con una superficie de 4-00-00-0 Has, definida por la poligonal que tiene las siguientes coordenadas UTM ITRF92 (tabla 4.1).

Tabla 4.1 Coordenadas de la poligonal que delimita el banco de material

Vértice	Coordenada X	Coordenada Y
1	367245	2283709
2	367322	2283822
3	367386	2283853
4	367365	2284050
5	367335	2284038
6	367126	2283765

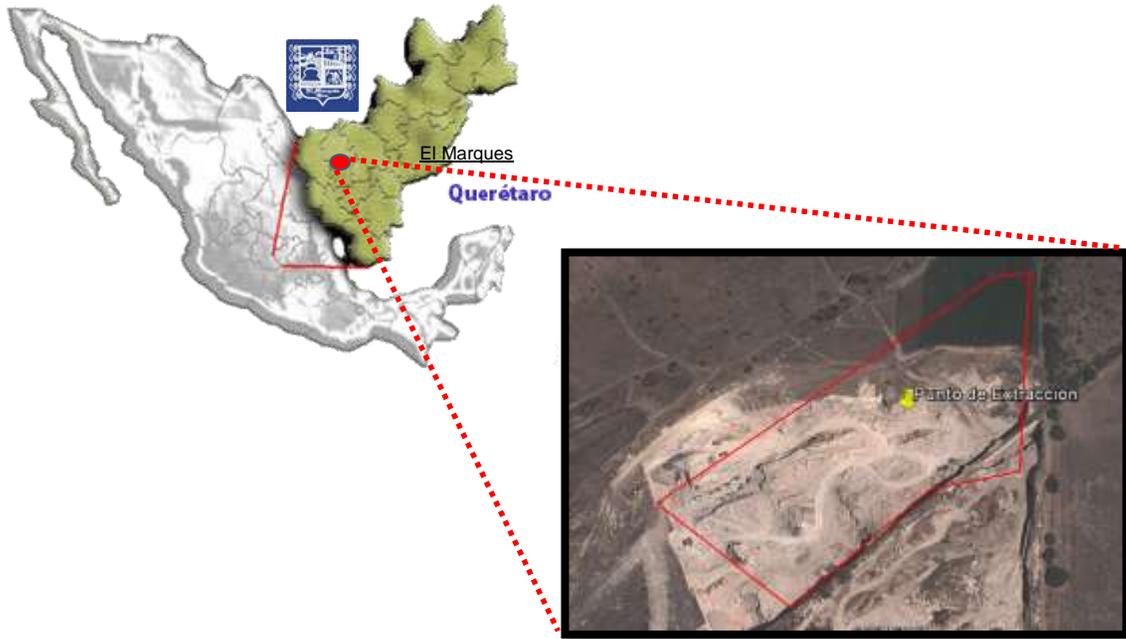


Figura 4. 1 Localización del banco de material tepetate conocido como “El Rosario”



Figura 4. 2 Muestreo de tepetate en el banco de material.

En la figura 4.2 se muestra el proceso de extracción de muestras de tepetate del banco seleccionado, obteniendo una cantidad aproximada de 200 kg de suelo colocado en costales, y trasladado a las instalaciones donde se continuó con la etapa caracterización y experimentación.

4.2 Caracterización geotécnica del Tepetate natural en estudio

La caracterización del tepetate se realizó mediante la determinación de propiedades índices, mecánicas y mineralógicas (figura 4.3) del suelo extraído en banco, permitiéndonos conocer las condiciones que presenta el suelo en su estado natural, y a su vez tener un punto de partida que permita verificar la influencia del mejoramiento final respecto al estado original del suelo.



Figura 4. 3 Pruebas de laboratorio para la caracterización geotécnica del tepetate

De acuerdo a los resultados obtenidos (tabla 4.2) se observa una granulometría con mayores porcentajes de partículas gruesas (figura 4.4), en su mayoría arenas con una cantidad considerable de finos no plásticos ya que no presentaron valores de límites de consistencia que reflejaran problemas de plasticidad, por lo que se puede decir que las características de nuestro material, exhibe una matriz de arena limosa (SM), clasificado de acuerdo a SUCS y de acuerdo a AASHTO como A-2-4 (0), (tabla 4.3) con una resistencia a la compresión simple baja de 1.29 Mpa y una conductividad hidráulica de baja a muy baja con un valor de 4.90×10^{-7} , y una densidad máxima de 1.067 kg/m³ con una humedad óptima de 28% de acuerdo al ensayo de compactación proctor estándar.

Tabla 4.2 Resultados de caracterización geotécnica del tepetate

Caracterización geotécnica del tepetate			
<i>Procedimiento</i>		<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
Peso volumétrico Seco Suelto		Kg/m ³	883.2
	Grava	%	15.02
Granulometría	Arena	%	56.89
	Finos	%	28.09
Límites de Consistencia	Límite Líquido, Límite Plástico e Índice Plástico	--	No presenta
Compactación Proctor Estándar	Humedad	%	28.00
	Pesos Volumétrico Seco Máximo	Ton/m ³	1.067
Resistencia a la compresión simple		Kg/cm ²	1.29
Coefficiente de permeabilidad		m/s	4.90×10^{-7}
Mineralogía (Difracción de Rayos X)		Albita, Cuarzo, Anortita	

Tabla 4.3 Resultados de clasificación de suelos

<i>Descripción</i>	<i>Nomenclatura</i>	<i>Clasificación</i>	
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	SUCS	SM	Arena Limosa
Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes	AASHTO	A-2-4(0)	Gravas y arenas limosas y arcillosas

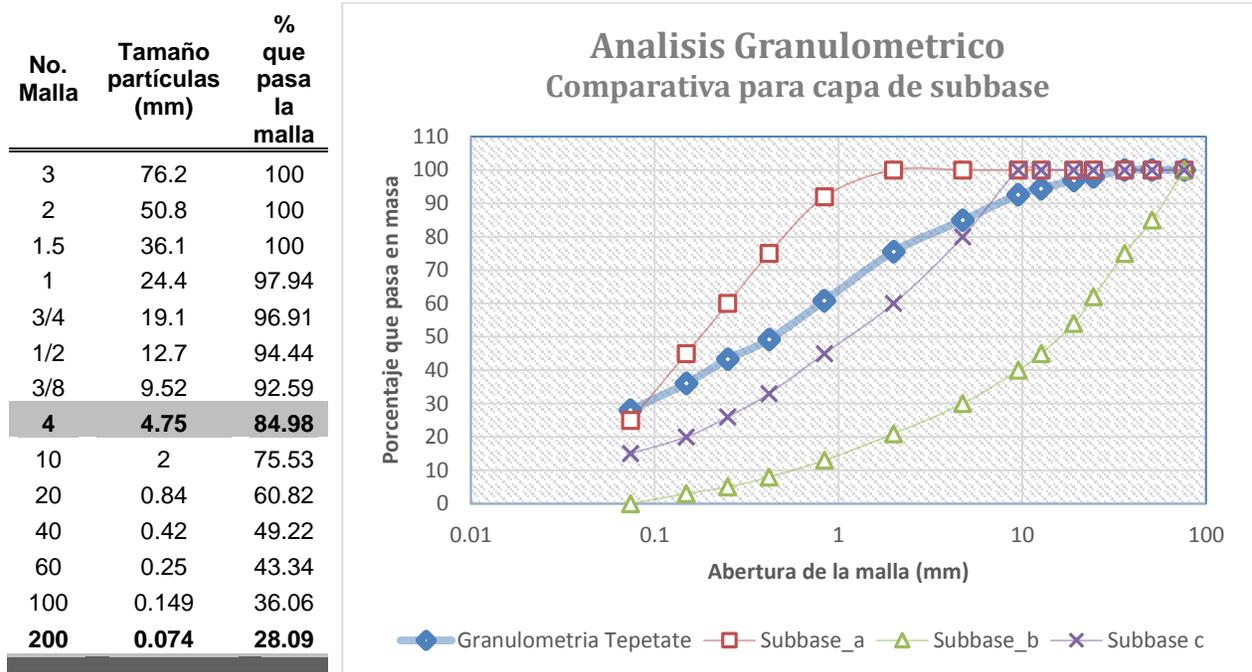


Figura 4. 4 Granulometría del tepetate estudiado

En la figura 4.4 se observa la descripción de la granulometría presente en el tepetate, en donde se incluyen los puntos que delimitan la zona granulométrica requerida para los materiales que se utilicen en la capa de subbase del pavimento, observándose que la granulometría de nuestro suelo se encuentra dentro de esta zona, cumpliendo con este requisito que marca la normativa para construcción de pavimentos asfálticos.

Otro punto de importante fue el análisis de la mineralogía del material, realizado mediante un estudio de difracción de rayos X (RDX), con equipo Difractómetro de rayos x (Miniflex de Rigaku), a partir del cual conocemos los minerales predominantes en el tepetate, mismos que intervienen directamente en el mejoramiento de nuestro suelo, particularmente en la reacción química que ocurra con la adición de cal.

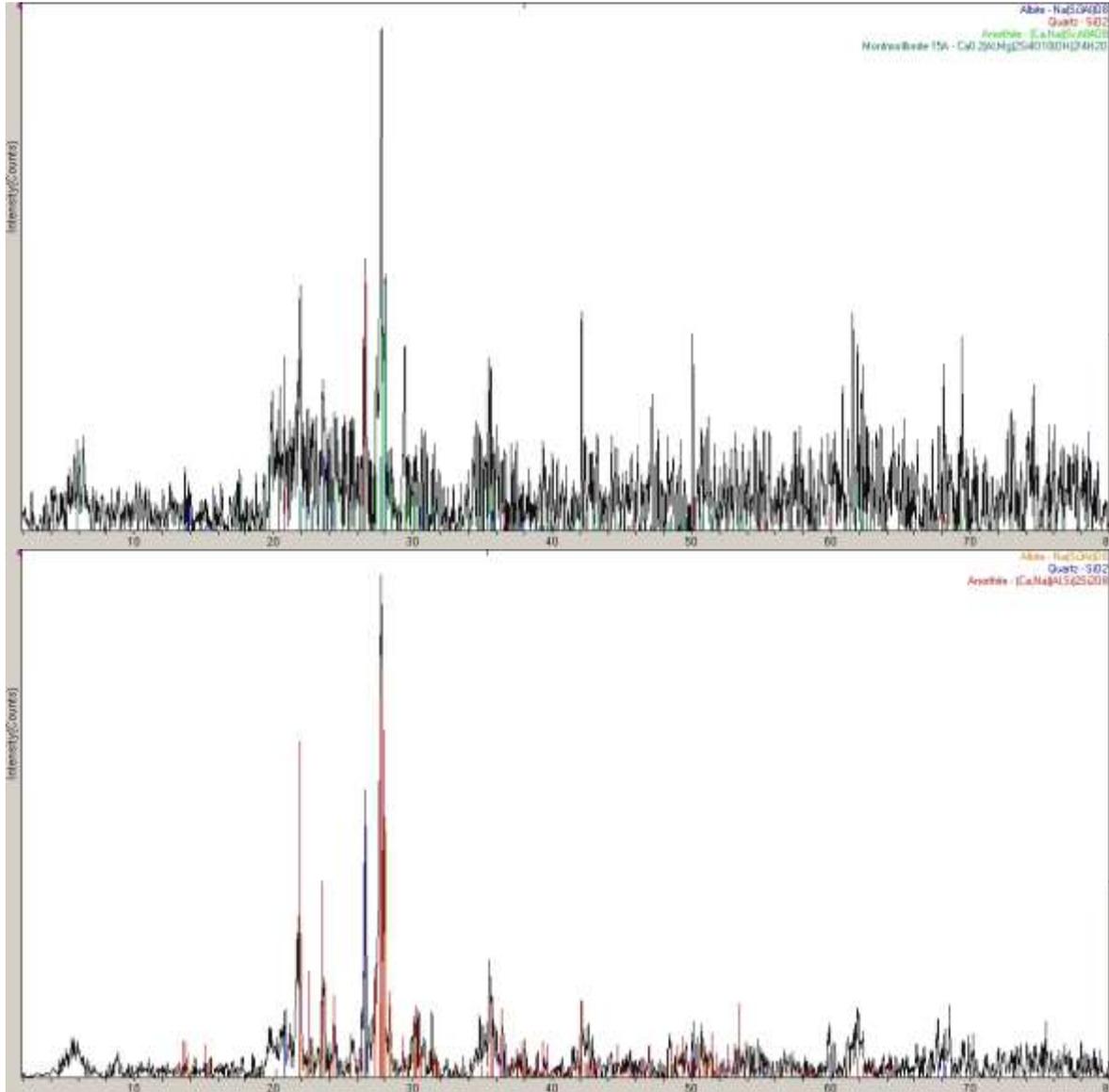


Figura 4. 5 Difractograma resultante del análisis de difracción de rayos X (DRX). a) Banco de material El Marques, b) Banco de material Mompani utilizado en López Lara, 2012

En la figura 4.5 se aprecia los difractogramas resultantes del análisis DRX, a modo de comparación entre el banco de material utilizado en la investigación de Lopez Lara 2012 y la presente investigación, en donde los picos predominantes indican la intensidad en la cual se refleja la presencia de determinado mineral, a partir del

cual encontramos que los minerales presentes en nuestro tepetate son principalmente; Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) que es un mineral del grupo de los tectosilicatos, Cuarzo (SiO_2) mineral compuesto de sílice considerado como minerales oxidos, Anortita($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) mineral que constituye una variedad de la plagioclasa, siendo un aluminosilicatos de calcio. Del análisis encontramos que los minerales presentes en ambos bancos son similares, sin embargo en el banco propósito de esta investigación (Banco de material El Marques) se encuentra cantidades mayores de arcilla (Montmorilonita), concluyéndose que la diferencia en comportamiento de resistencia entre bancos es consecuencia de la presencia de este mineral.

4.3 Propiedades obtenidas de mezcla tepetate-Cal

Una vez que se definió la cal a utilizar en la presente investigación, la cual fue una cal calcita hidratada (CL-90S) (figura 4.6), se continuo con la búsqueda de las cales hidratadas comerciales que ofrecen en la región, para verificar que cumplan con las características deseadas, se seleccionó la cal “Los arcos” la cual es una marca muy comercializada por los sitios de venta de materiales de la construcción y el costo es considerablemente bajo.



Figura 4. 6 Muestra de Cal hidratada para experimentación

Posteriormente se inicia con los ensayos que permitirán verificar la influencia de la cal en las propiedades mecánicas del tepetate, de acuerdo a los ensayos de evaluación previamente planteados.

4.3.1 Proctor Modificada

Para evaluar las propiedades mecánicas del material, los especímenes se realizan en su estado de densidad máxima y respectiva humedad óptima, estos parámetros se obtienen como resultado del ensaye de compactación proctor modificada, indicado para procesos constructivos en los que se utilice equipos de compactación pesado como es el caso de las vías terrestres. El procedimiento de ensaye fue realizado de acuerdo a la norma ASTM D 1557 (figura 4.8), esta describe y regula los procedimientos de compactación utilizados para determinar la relación entre el contenido de humedad y densidad seca de los suelos compactados mediante un martillo de 44.5 kN(10 lbf) que se deja caer desde una altura de 457 mm(18") y produce un esfuerzo de compactación de 2700 kNm/m³ (5600 lbpie/pie³). Existen varias alternativas de procedimiento (Método A, B, C, D) y su elección dependerá de la graduación del material. Para nuestro tepetate corresponde el procedimiento A, que es para suelos en los que el 20% o menos por peso del material es retenido sobre el tamiz 4.75mm(#4), cumpliendo con las características mostradas en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Características del método de ensaye proctor modificada

Método		A
Cilindro	Altura	11.68 mm (4.6")
	Diámetro	101.6 mm (4")
	Volumen	947 cm ³
Martillo	Peso	44.5 kN (10 lbf)
	Caída	457 mm (18")
Numero de capas		5
Numero de golpes		25
Material utilizado para malla N°		4

Se determinó las propiedades de densidad seca máxima (γ_d) y humedad óptima (h_{opt}) como resultado del análisis de las curvas de compactación derivadas del ensaye proctor modificada, los resultados del ensaye se muestran en la figura 4.7, en donde se observar un incremento de la densidad máxima del

compuesto a la vez que la humedad óptima disminuye conforme se aumenta el porcentaje de dosificación de cal.

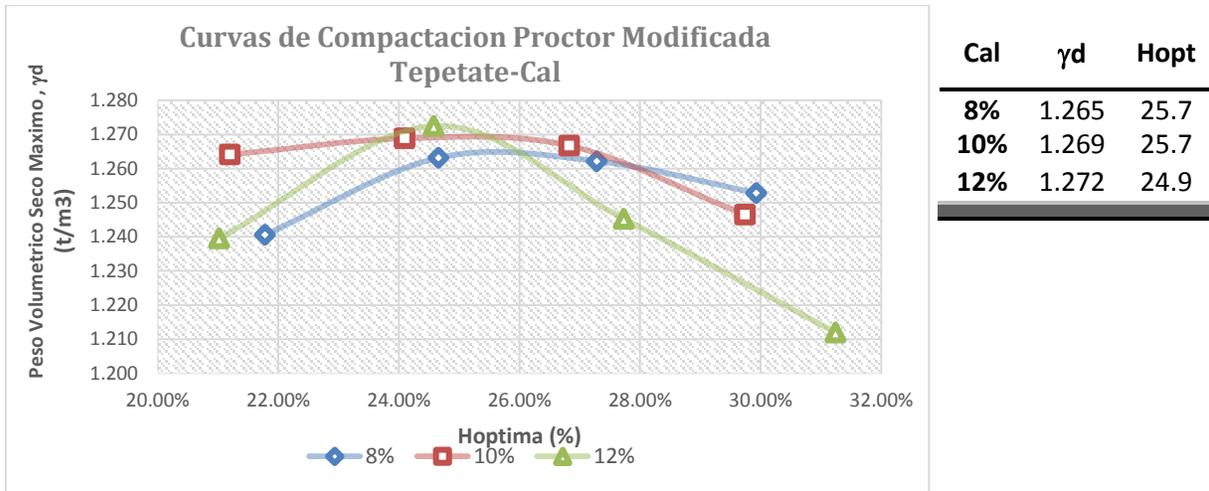


Figura 4. 7 Resultados de ensayos de compactación para mezcla de tepetate-cal

Este incremento de densidad evidencia que añadir cal aumenta la unión de las partículas, permitiendo confinar mayor cantidad de material en determinado volumen con menor cantidad de agua en el proceso de compactación.



Figura 4. 8 Procedimiento de ensayo proctor modificado con tepetate-cal

La importancia de este ensayo está relacionada con la compactación máxima alcanzada que proporciona las condiciones óptimas para que el terreno alcance su máxima resistencia, es por ello que los especímenes para evaluar las propiedades mecánicas (Compresión no confinada, tensión indirecta, valor relativo de soporte) son elaborados bajo estas condiciones, es decir las muestras serán preparadas en su densidad seca máxima y humedad óptima, para su posterior evaluación.

4.3.2 Compresión no confinada

La resistencia a la compresión simple (q_u), se realizó de acuerdo a la norma ASTM D2166-98, realizando el ensaye a compresión en carga axial no confinada en probetas de suelo normalizadas (37mm de Diámetro y 96mm de Longitud), en la cual se toman registros de la carga necesaria para deformar nuestra probeta de suelo resultando en un gráfico esfuerzo-deformación, en el cual la resistencia pico o resistencia ultima del espécimen, será cuando no sea capaz de resistir más esfuerzo y la deformación se incremente sustancialmente.



Figura 4. 9 Procedimiento de ensaye de compresión simple de mezcla tepetate-cal

Se realizaron de 3 a 5 probetas de suelo remoldeado para cada dosificación, obteniendo el resultado de q_u mediante el promedio de estas, la tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos para las dosificaciones Tepetate-Cal que se analizaron.

En los resultados de la resistencia a la compresión se observa un mejoramiento considerable en la capacidad de las probetas para resistir esfuerzos, obteniendo como valor más alto una resistencia de 16.85 kg/cm² a los 28 días para una dosificación del 12%, sin embargo el incremento respecto a la dosificación de 10% es minima, que en principio no resulta factible utilizar más cal.

Tabla 4.5 Resultados compresión simple de mezcla tepetate-cal

Resistencia a la compresión simple			
<i>Dosificación</i>	<i>Edad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resistencia (q_u)</i>
8% Cal	28 Dias	Kg/cm ²	14.04
10% Cal	28 Dias	Kg/cm ²	16.07
12% Cal	28 Dias	Kg/cm ²	16.85

4.3.3 Ensayo de Tensión Indirecta

El ensayo a la tensión indirecta, ASTM C496 también conocida como ensayo brasileño (figura 4.10), consiste en someter a compresión diametral a lo largo de una probeta cilíndrica, hasta alcanzar la falla.



Figura 4. 10 Procedimiento de ensayo de tensión indirecta en mezcla tepetate-cal

Se realizaron de 3 a 5 probetas de suelo remoldeado con la inclusión de cal, y mediante el promedio de estas obtener el valor final de resistencia a la tensión del compuesto (tabla 4.6). Utilizando la siguiente ecuación se calculan los esfuerzos de tensión a los que está sometida la probeta.

$$T = \frac{2P}{\pi ld}$$

Donde:

T= Resistencia a la tensión

P= Carga máxima

l= longitud de la muestra

d= Diámetro de la muestra

Tabla 4.6 Resultados de ensayos de tensión indirecta de mezcla tepetate-cal

Ensayo de Tensión Indirecta (Brasileña)			
<i>Dosificación</i>	<i>Edad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resistencia a la Tensión (T)</i>
8% Cal	28 Dias	Kg/cm2	1.20
10% Cal	28 Dias	Kg/cm2	1.34
12% Cal	28 Dias	Kg/cm2	1.37

A pesar de que no persigue ese propósito, la adición de cal tiene efectos positivos también en la resistencia a la tensión, derivado de esa cementación que mejora la unión de partículas. Los resultados reflejan un valor máximo de T de hasta 1.37 kg/cm², siendo que el valor inicial del suelo natural fue de 0.21 kg/cm².

4.3.4 Valor Relativo de Soporte

El ensaye de Valor relativo de soporte (VRS), realizado conforme a la norma ASTM D1883-99 (figura4.11), la prueba se desarrolló empujando un pistón estandarizado dentro del suelo a una tasa de penetración determinada(1.27 mm/min) y midiendo la carga requerida para mantener dicha tasa, tomando lecturas de penetración a niveles de profundidad especificados en la norma (tabla 4.7). Y siendo comparados con la misma relación de carga-penetración pero de una muestra patrón (roca triturada compactada) (tabla 4.8).

Tabla 4.7 Penetración para ensaye VRS

<i>mm</i>	<i>Plg</i>
2.5	0.10
5.0	0.20
7.5	0.30
10.0	0.4
12.7	0.5

Tabla 4.8 Carga Unitaria Patrón

<i>Mpa</i>	<i>Psi</i>
6.9	1000
10.3	1500
13.0	1900
16.0	2300
18.0	2600



Figura 4. 11 Procedimiento de ensaye VRS para mezcla de tepetate-cal

De la relación carga-penetración resultante se puede determinar el valor VRS, este número usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.5mm (0.1 plg), calculado mediante la siguiente expresión.

$$VRS = \frac{\text{Carga unitario del ensayo (tepetate)}}{\text{Carga Unitaria Patron (1360 kg)}} * 100$$

En la tabla 4.9 se observan los resultados obtenidos para el valor VRS de las mezclas de tepetate-cal para las dosificaciones analizadas.

Tabla 4.9 Resultados de VRS para mezcla de tepetate-cal

Dosificación	Valor Relativo de Soporte		VRS
	Descripción	Unidad	
8% Cal	Seco	%	40.12
10% Cal	Seco	%	44.29
12% Cal	Seco	%	45.11

En los resultados se aprecia un VRS máximo de 45.11, que representa un incremento considerablemente alto respecto al valor VRS de 25.36 que presento en estado natural.

4.3.5 Resumen de resultados de ensayos mecánicos

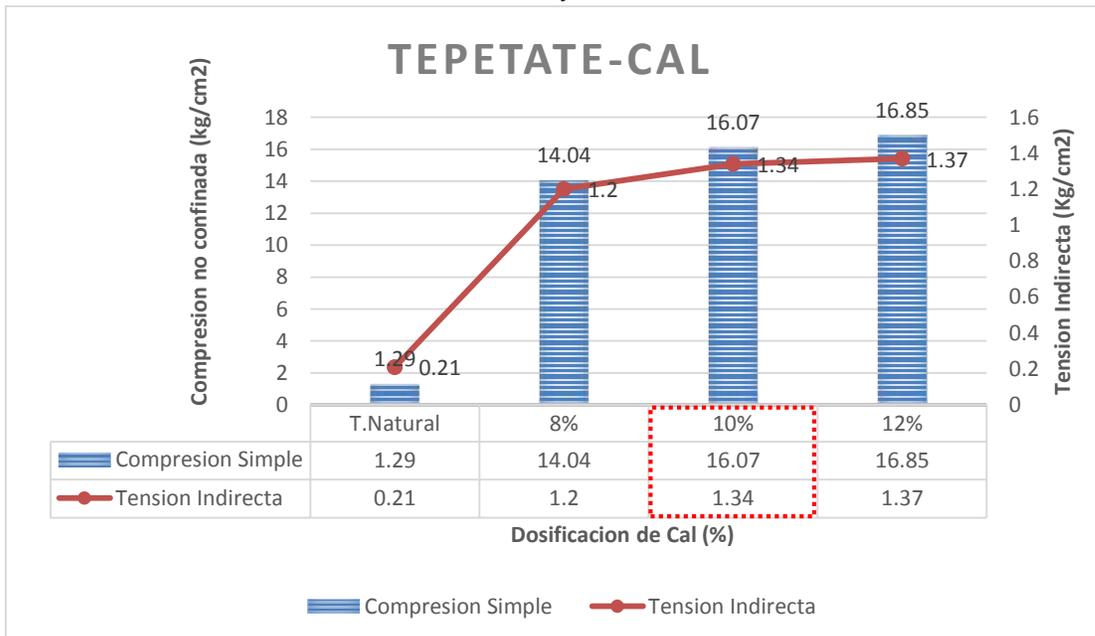


Figura 4. 12 Resumen de ensayos de compresión y tensión

La figura 4.12 muestra los resultados obtenidos en los ensayos para medir la influencia de la cal en las propiedades de compresión y tensión del tepetate, encontrándose que existe un incremento significativo de estos parámetros de resistencia mecánica comparados con los del suelo en estado natural. La compresión simple es la que refleja mayor incremento siendo del orden de 13 veces más que en su estado original.

Del mismo modo se evaluó la influencia de la cal en la capacidad portante del suelos (figura 4.13), encontrándose que se incrementa del orden de una 30% más que el VRS en estado natural. Con los datos resultantes del ensaye de VRS, se obtuvo el *módulo resiliente* del tepetate, mediante la correlación VRS-Modulo resiliente propuesta por Shell (Heukelomm y Foster 1960), siendo este un valor fundamental para el diseño de pavimentos, que validara la influencia de nuestro suelo mejorado en el dimensionamiento y comportamiento de la estructura del pavimento.

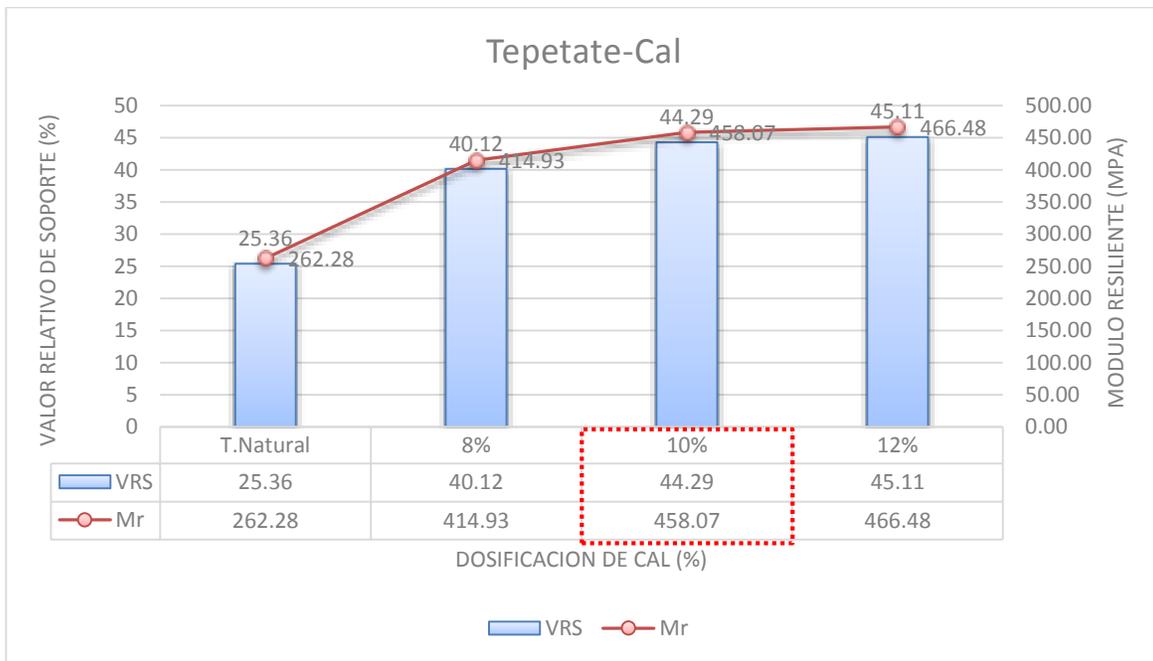


Figura 4. 13 Resumen de ensayos de capacidad de soporte del suelo

Del análisis de todos los resultados en esta etapa de experimentación se observa que la dosificación que obtiene mayores incrementos en las propiedades mecánicas del tepetate es la de 12% de cal. Sin embargo se concluye que el valor óptimo a utilizar en las etapas subsecuentes es la dosificación del **10% Cal**, respaldado en que el incremento de resistencia es mínimo para lo que significaría el utilizar un 2% más de cal en términos de costos y procesos implicados.

4.4 Propiedades obtenidas de mezcla tepetate-Fibras

Para esta etapa se optó por el uso de fibras artificiales y/o sintéticas, para lo cual una opción viable fue la del uso de fibras metálicas producto de residuos de procesos industriales, en este caso fibras metálicas de acero denominadas “rebabas” (figura 4.14) como producto de residuos de procesos de tornacion. Para lo cual se realizó la búsqueda en los Tornos existentes en la zona de estudio encontrándose con una gran cantidad de estos y brindando el apoyo necesario para la disposición de estos residuos de forma gratuita.



Figura 4. 14 Fibras metálicas de acero “rebabas”.

Con el propósito de obtener mayor información referente a esta fibra, ya que al ser un producto de residuo no se tiene un conocimiento a detalle de las propiedades de nuestro elemento, se realizó una caracterización general de la fibra metálica en particular, y obtención de las propiedades a tensión que refleja en forma individual, siendo que su utilización está enfocada al mejoramiento de este parámetro de tensión en el suelo.

Tabla 4. 10 Características físicas y de tensión de la fibra metálica “rebaba”.

Nr	Esp. mm	Ancho mm	Long trab mm	Area mm ²	M Elast. MPa	σ Tensión MPa	Elong. %
1	0.29	5.5	10	1.595	95.4	33.76	18.95
2	0.2	4.18	10	0.836	57.01	19.02	18.13
3	0.26	7.99	10	2.077	17.12	43.64	18.77
4	0.25	5.24	10	1.31	221.24	173.46	97.47
5	0.24	5.32	10	1.277	39.76	100.88	33.5

Mediante las curvas esfuerzo-deformacion (figura 4.15) resultantes del ensaye de tension directa(ASTM D882), realizado con el equipo de ensaye de tension de peliculas delgadas (Zwick/Roell), se obtuvieron los valores de esfuerzo de tension que resiste la fibra y su respectivo Modulo elastico, indicadores de la capacidad que tiene nuestra fibra metalicas de resistir la tension.

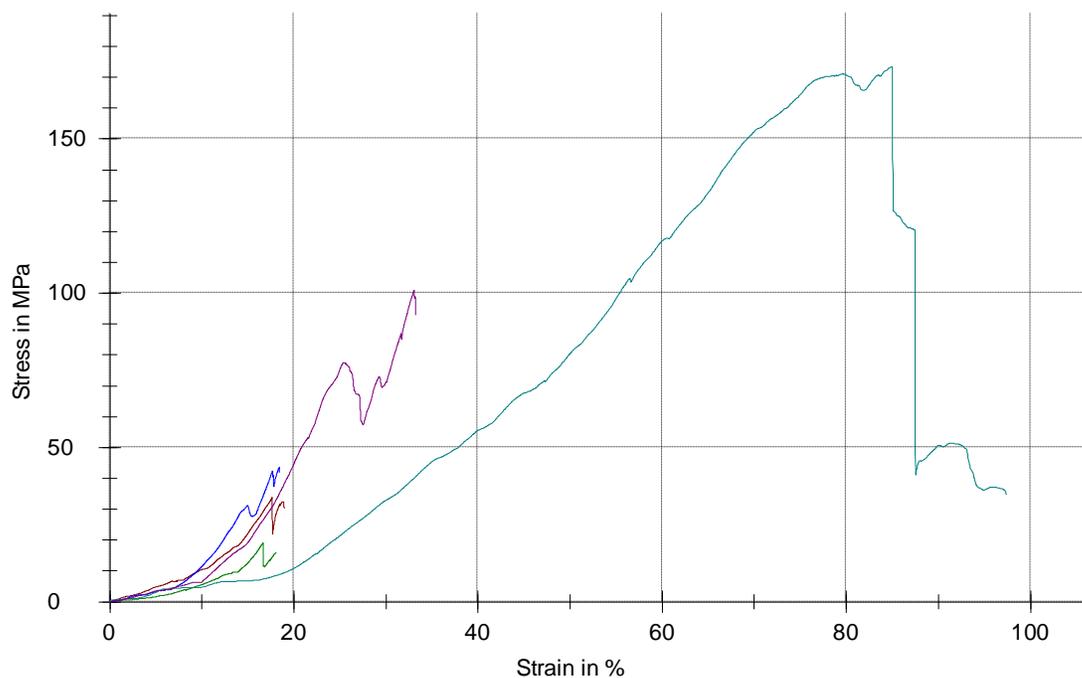


Figura 4. 15 Curvas esfuerzo-deformación resultante de ensaye de tensión directa

De manera análoga a la etapa anterior se verifica la influencia de la fibra en las propiedades mecánicas del tepetate, mediante los mismos ensayos mencionados. Siendo importante resaltar que se preparan los especímenes a ensayar en sus propiedades óptimas de compactación, es decir, en su densidad seca máxima y humedad óptima a su vez obtenidos mediante el ensayo proctor modificado.

4.4.1 Proctor Modificada

Se determinó las propiedades de densidad seca máxima (γ_d) y humedad óptima (h_{opt}) como resultado de la prueba de compactación proctor modificada (figura 4.17), para a partir de estos elaborar los especímenes a ensayar en las pruebas mecánicas. Los resultados del ensayo se muestran en la figura 4.16.

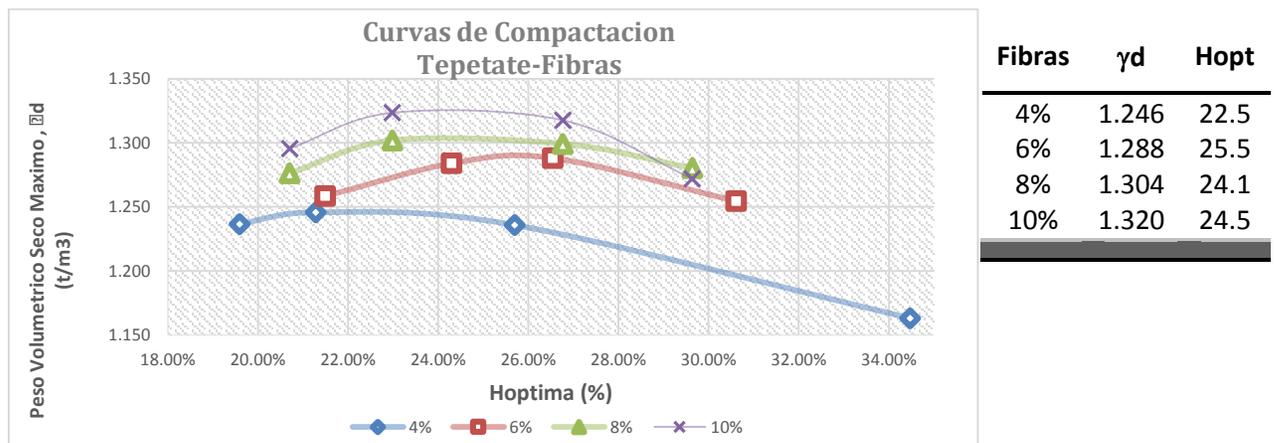


Figura 4. 16 Resultados de ensayo de compactación para mezcla de tepetate-fibras

Similar a la etapa anterior los valores de densidad máxima se ven incrementados a medida que es mayor la dosificación de fibras, sin embargo la humedad óptima no se comporta de manera descendente, sino más bien se mantiene en un mismo valor.



Figura 4. 17 Procedimiento de ensaye proctor modificada para mezcla de tepetate-fibra

4.4.2 Propiedades mecánicas de la mezcla de tepetate-fibras

Se evaluaron las mezclas de tepetate-fibra con las mismas pruebas mecánicas utilizadas en todas las etapas (Compresión simple, Tensión indirecta, VRS) (figura 4.18).



Figura 4. 18 Ensayes realizados para la experimentación tepetate-fibras.

Los resultados de cada uno de estos ensayos de muestran en las tablas subsecuentes. En la tabla 4.11 se muestran los resultados de compresión simple, en donde se aprecia un incremento respecto al tepetate natural, sin embargo este no es tan significativo como lo fue en la etapa de cal, el valor máximo alcanzado en esta etapa fue de 3.19 kg/cm².

Tabla 4.11 Resultados de ensaye a compresión simple de la mezcla tepetate-fibras

<i>Dosificación</i>	<i>Edad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Compresión Simple, qu</i>
4% Fibras	28 Dias	Kg/cm ²	2.45
6% Fibras	28 Dias	Kg/cm ²	2.83
8% Fibras	28 Dias	Kg/cm ²	3.05
10% Fibras	28 Dias	Kg/cm ²	3.19

La tabla 4.12 refleja los resultados de tensión indirecta de la mezcla tepetate-fibras, en donde se aprecia un valor máximo de 0.62 kg/cm². Los valores que arroja no representan un incremento significativo, referente al tepetate natural.

Tabla 4. 12 Resultados de ensaye a tensión indirecta de la mezcla tepetate-fibras

<i>Dosificación</i>	<i>Edad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Tensión Indirecta</i>
4% Fibras	28 Dias	Kg/cm ²	0.41
6% Fibras	28 Dias	Kg/cm ²	0.56
8% Fibras	28 Dias	Kg/cm ²	0.62
10% Fibras	28 Dias	Kg/cm ²	0.56

En relación a la capacidad portante de la mezcla tepetate-fibras, se observa en la tabla 4.13, un valor máximo de 31.56 que refleja si un incremento, mas no tan grande como se plantea alcanzar.

Tabla 4. 13 Resultados de ensaye de VRS de la mezcla tepetate-fibras

<i>Dosificación</i>	<i>Edad</i>	<i>Unidad</i>	<i>VRS (%)</i>
4% Fibras	28 Dias	%	26.48
6% Fibras	28 Dias	%	28.42
8% Fibras	28 Dias	%	30.78
10% Fibras	28 Dias	%	31.56

En las figuras 4.19 y 4.20 se resumen los resultados de pruebas de laboratorio, para el análisis de influencia de la fibra en las propiedades de resistencia del tepetate, se aprecia un incremento de los parámetros de compresión y tensión del orden de 2.5 veces más que el tepetate sin refuerzo, y

en la capacidad portante del suelo se refleja un incremento del orden de 25%. En esta etapa presenta mayor relevancia el refuerzo a tensión por lo que se concluye que la dosificación que proporciona valores óptimos es la dosificación de tepetate con 8% de fibras.

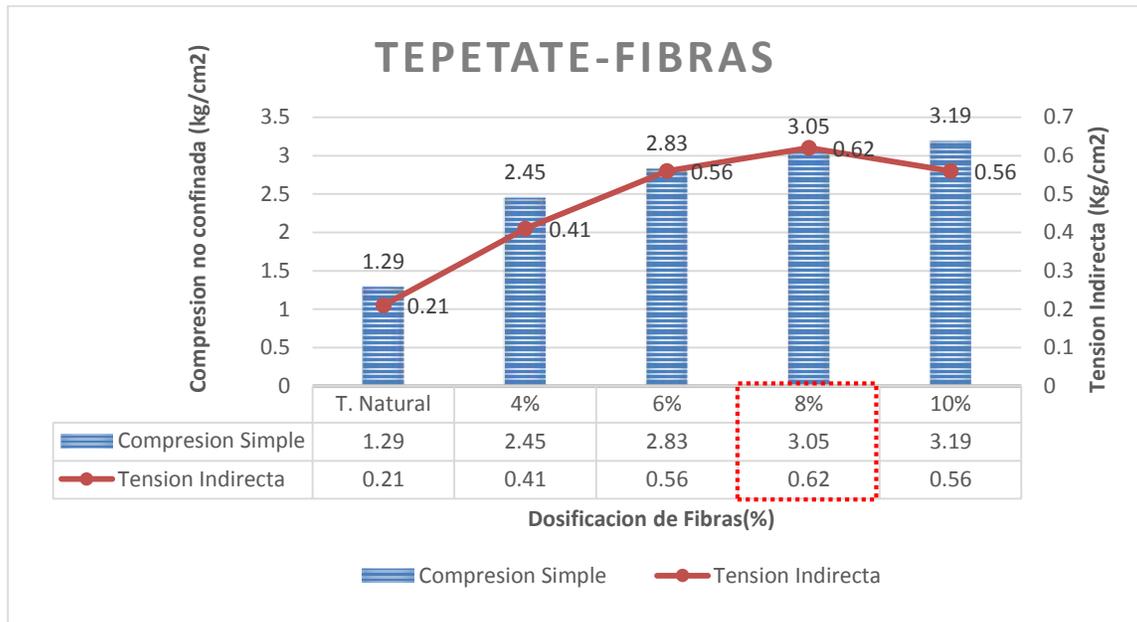


Figura 4. 19 Resumen de ensayos de compresión y tensión, mezcla tepetate-fibra

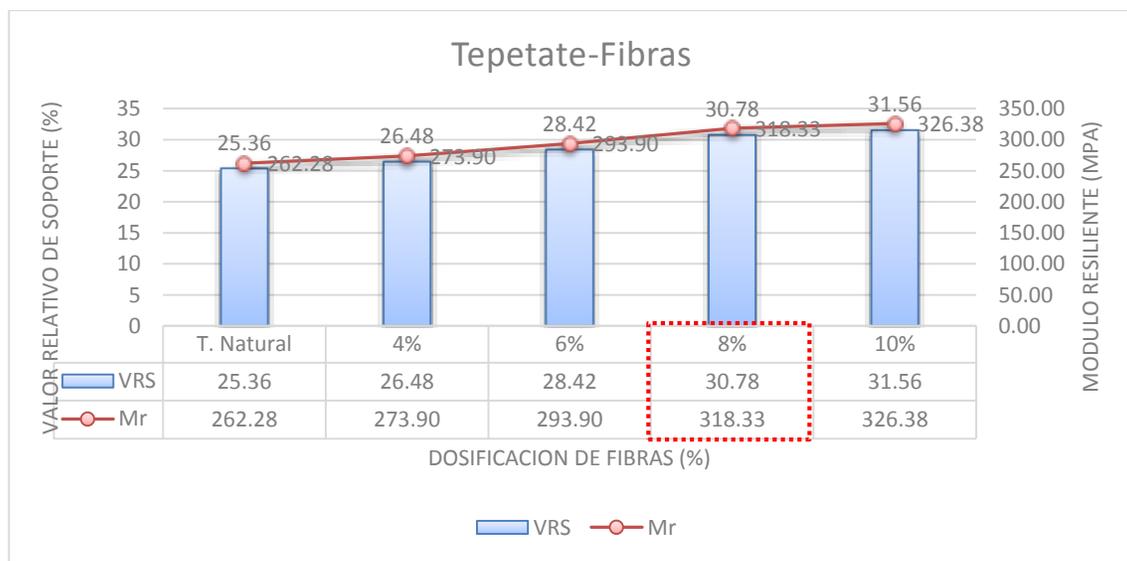


Figura 4. 20 Resumen de ensayos de capacidad de soporte del suelo, mezcla tepetate-fibras

Los resultados de esta etapa no reflejan un incremento relevante en comparación al provocado por la experimentación con cal, sin embargo se espera que en la etapa subsecuente de interacción de ambos aditivos, los resultados respalden un incremento mayor a la suma de ambas etapas en forma independiente.

4.5 Propiedades obtenidas de mezcla Tepetate-Cal-Fibras

Se evaluó la mezcla final de tepetate-cal-fibra con el mismo procedimiento planteado en las etapas anteriores y mediante la evaluación de las mismas pruebas mecánicas (Compresión simple, Tensión indirecta, VRS) (figura 4.18).



Figura 4. 21 Ensayes realizados para la experimentación con tepetate-cal-fibras

4.5.1 Compactación Proctor Modificada

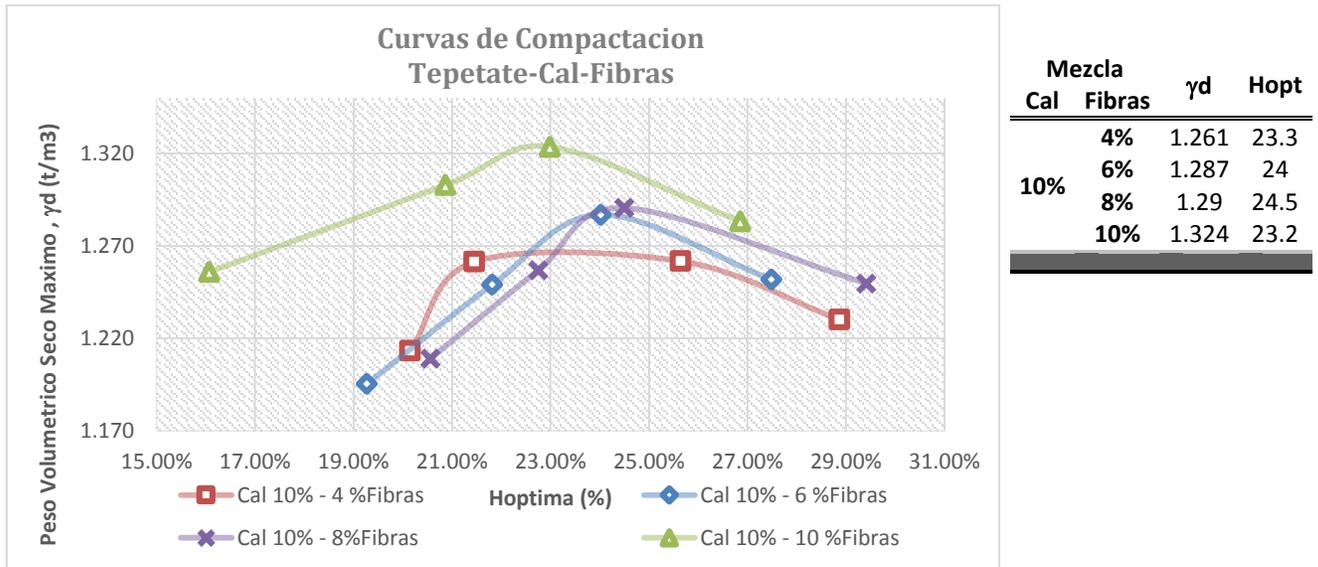


Figura 4. 22 Resultados de ensaye de compactación para mezcla de tepetate-cal-fibras

El comportamiento de la densidad máxima fue similar en todas las etapas de investigación, aun en esta etapa final se incrementa la densidad conforme aumenta la dosificación y en este caso la humedad óptima se mantienen en una variación muy pequeña de humedad en relación al aumento de la dosificación.

4.5.2 Propiedades mecánicas de la mezcla de Tepetate-Cal-Fibras

Los resultados de cada uno de estos ensayos que verifican el mejoramiento de nuestra mezcla final se muestran en las tablas subsecuentes.

En la tabla 4.14 se muestran los resultados de compresión simple, evaluadas a diferentes edades, en donde se aprecia un incremento muy importante en este parámetro, llegando alcanzar un valor máximo de 30.26 kg/cm² a la edad de 28 días, para una dosificación de Tepetate con 10% de Cal- 8 % de Fibra.

Tabla 4.14 Resultados de compresión simple de la mezcla final tepetate-cal-fibras

Dosificación	Unidad	Compresión Simple, qu		
		14 días	28 días	60 días
10% Cal – 4% Fibras	kg/cm ²	19.05	21.86	22.63
10% Cal – 6% Fibras	kg/cm ²	19.87	22.10	24.65
10% Cal – 8% Fibras	kg/cm ²	23.43	28.09	30.26
10% Cal – 10% Fibras	kg/cm ²	22.07	25.05	27.98

La propiedad de resistencia a la tensión mostrada en la tabla 4.15 se ve notablemente mejorada hasta alcanzar un valor de 3.00 kg/cm², que comparativamente con el 0.21 de tepetate natural, muestra un cambio muy favorable en su capacidad de resistir estos esfuerzos.

Tabla 4. 15 Resultados de tensión indirecta de la mezcla final tepetate-cal-fibras

Dosificación	Unidad	Tensión Indirecta
10% Cal – 4% Fibras	kg/cm ²	2.32
10% Cal – 6% Fibras	kg/cm ²	2.38
10% Cal – 8% Fibras	kg/cm ²	2.92
10% Cal – 10% Fibras	kg/cm ²	3.00

La capacidad portante de la mezcla final, sufre un incremento muy importante para los propósitos que persigue la investigación dentro de su enfoque hacia pavimentos, ya que se alcanza valores de VRS de hasta 77, estos valores son semejantes a los arrojados por una grava triturada utilizada en la capa base, con esto se demuestra la eficacia del mejoramiento en este parámetro ya que el valor inicial de VRS es de 25 en el tepetate en estado natural (tabla 4.16).

Tabla 4. 16 Resultados de VRS de la mezcla final tepetate-cal-fibras

Dosificación	Unidad	Valor relativo de Soporte, VRS	
		Seco	Saturado
10% Cal – 4% Fibras	%	56.37	32.42
10% Cal – 6% Fibras	%	62.00	40.87
10% Cal – 8% Fibras	%	77.52	69.06
10% Cal – 10% Fibras	%	63.43	39.45

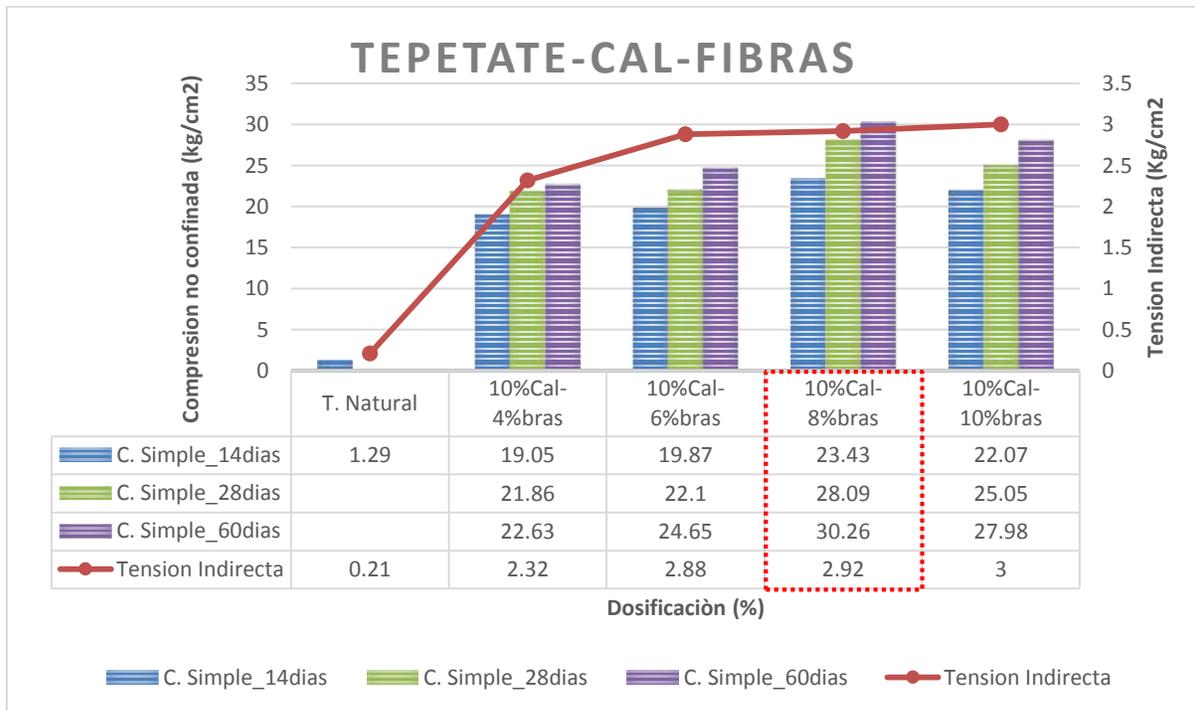


Figura 4. 23 Resumen de ensayos de compresión y tensión, mezcla tepetate-cal-fibra

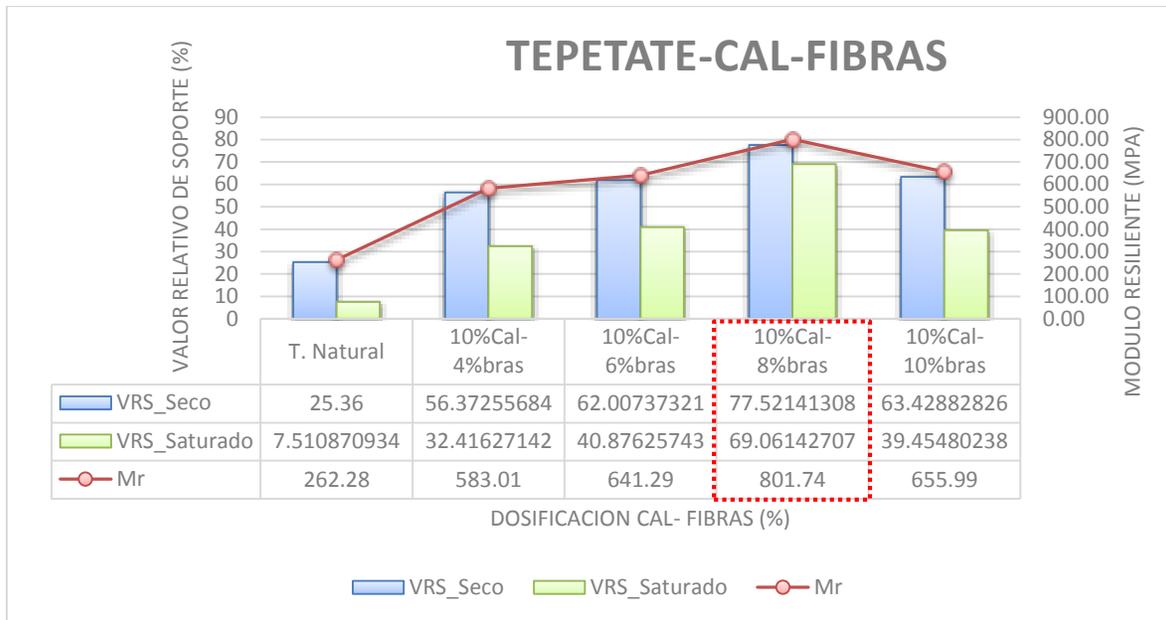


Figura 4. 24 Resumen de ensayos de capacidad de soporte del suelo, mezcla tepetate-cal-fibras

En las figuras 4.23 y 4.24 se resumen los resultados de pruebas de laboratorio realizadas para el análisis de la influencia de la interacción de cal y fibras metálicas en las propiedades de resistencia del tepetate estudiado, se aprecia un incremento notable en los parámetros de compresión y tensión. En compresión simple se refleja un aumento de 23 veces más de resistencia a la edad de 60 días, y en tensión indirecta se incrementa en 14 veces el valor del tepetate sin reforzar. Respecto a la capacidad portante del suelo se encontró que el valor VRS y su respectivo módulo de resiliente se incrementan 3 veces más que su valor inicial sin refuerzo.

De esta etapa final en la que interactúan todos los elementos de la investigación, es decir la mezcla final de tepetate-cal-fibras, se concluye que la hipótesis planteada se cumple es su totalidad, y también podemos encontrar que la dosificación que aporta mejores resultados es la de tepetate con **10% de Cal y 8% de fibras** considerando todos los parámetros (compresión, tensión, capacidad portante) analizados.

- Resistencia a la flexión

Con la dosificación determinada como optima de la mezcla final (10% Cal-8% Fibras), se evaluó la resistencia a la tensión por flexión de nuestro suelo, realizando probetas prismáticas, que se ensayaron a flexión como una viga libremente apoyada (figura 4.23 y 4.24). Esto únicamente como un aporte extra de la influencia de los aditivos en las propiedades mecánicas del suelo. La resistencia a la flexión se determina a través de la prueba de Módulo de Ruptura (MR) de acuerdo con la norma ASTM C 78 "Resistencia a la Flexión del concreto", en la que se aplica la carga a los tercios del claro en una viga de concreto.



Figura 4. 25 Preparación de vigas para resistencia a la flexión

Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro el módulo de ruptura se calcula como sigue:

$$M. R. = \frac{PL}{bd^2} = \frac{435.42kg * 31cm}{15cm(12.5cm)^2} = 5.76 \frac{kg}{cm^2}$$

Donde:

M.R: Modulo de ruptura, en kPa (kgf/cm²)
P: Es la carga máxima aplicada, en N (kgf)
L: Es la distancia entre apoyos, en cm
b: Es el ancho promedio del espécimen, en cm



Figura 4. 26 Ensayo de Resistencia a la tensión

Se obtuvo un valor de MR igual a 5.76 kg/cm², comparable con el módulo de ruptura del concreto que trabaja principalmente a flexión de 40 kg/cm², concluyéndose que para un suelo de material arenoso como el analizado, el valor obtenido después del mejoramiento de este parámetro, puede considerarse bueno.

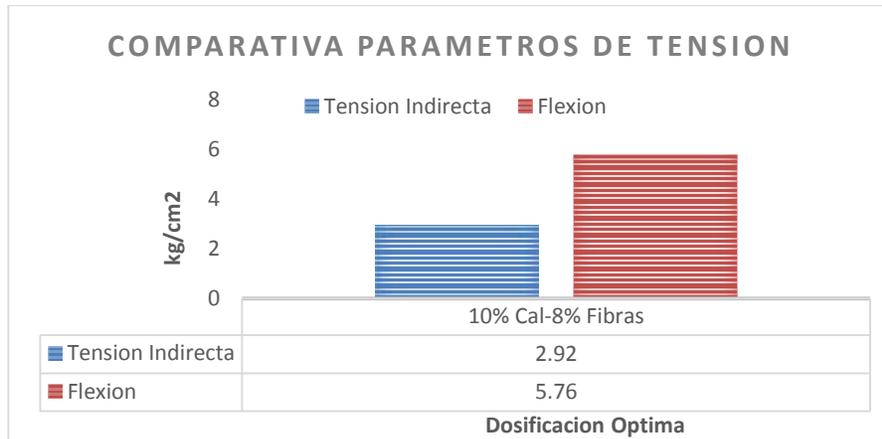


Figura 4. 27 Comparativa de flexión y tensión para la dosificación óptima

4.6 Resumen de Resultados por tipo de ensaye

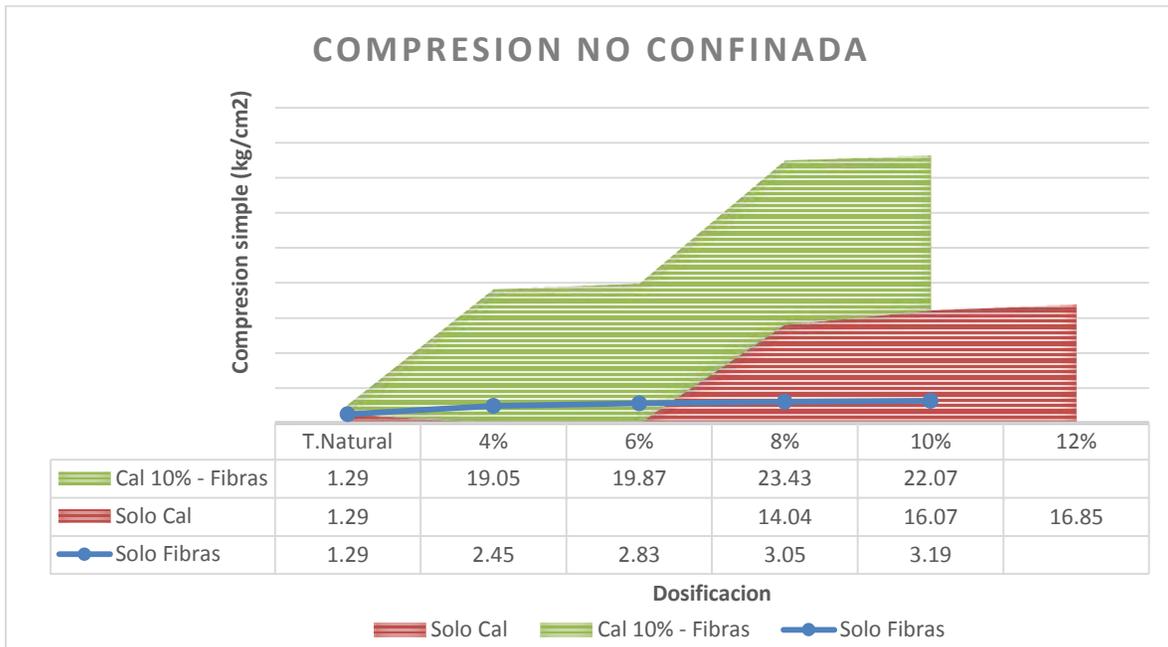


Figura 4. 28 Resumen de resultados de ensaye de compresión no confinada

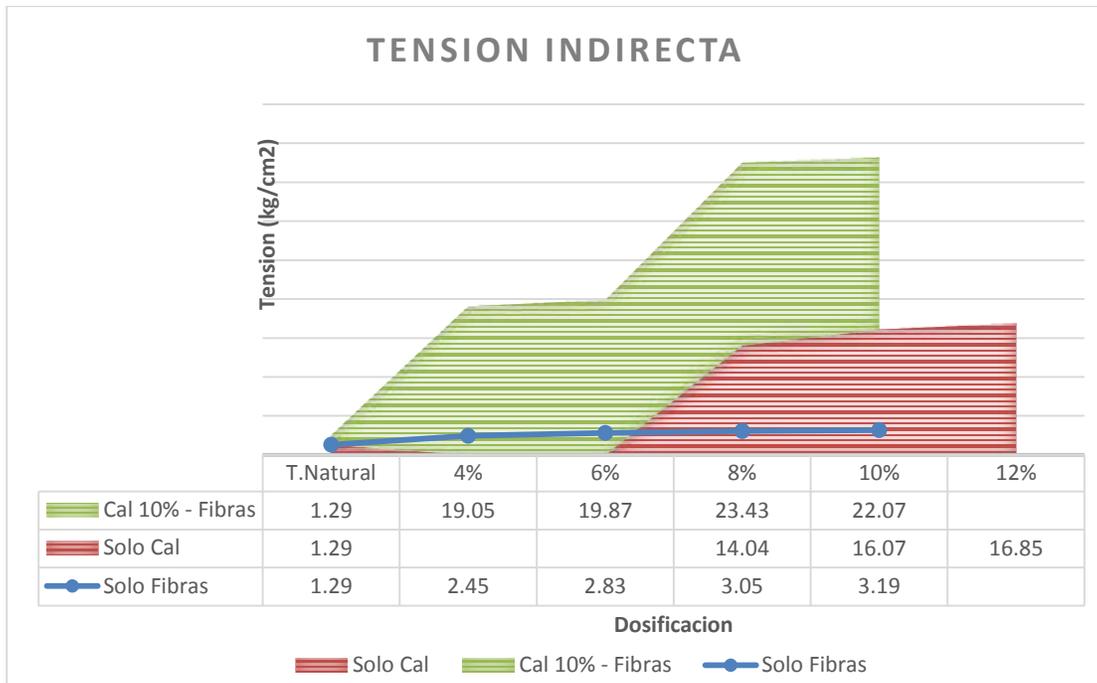


Figura 4. 29 Resumen de resultados de ensaye de tensión indirecta

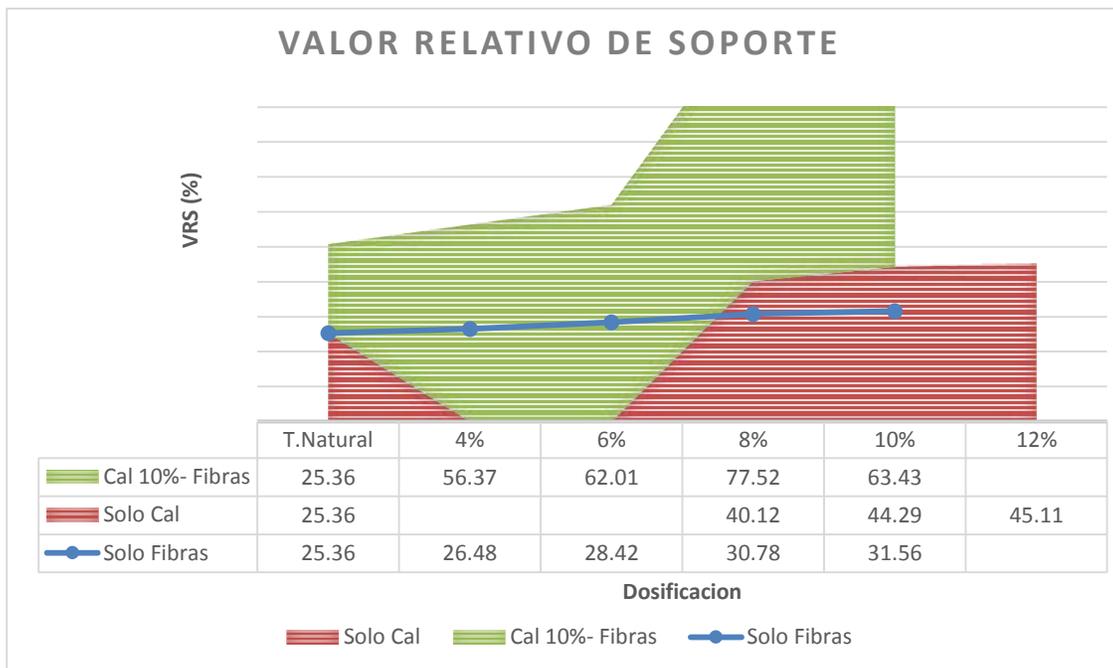


Figura 4. 30 Resumen de resultados de ensaye de VRS

4.7 Ejemplo de diseño de pavimento con tepetate mejorado

4.7.1 Descripción

Para el presente ejemplo se tomó el tramo de carretera Guadalajara-Tepic (figura 4.27), que forma parte de la red federal libre MEX-015, de donde se tomaron los datos de volumen de tránsito, para su posterior transformación en ejes equivalentes y espectro de carga, que demandan los diseños de pavimentos empíricos y empírico-mecanicistas, y evaluar la influencia de nuestro tepetate mejorado (Tepetate con 10%Cal-8%Fibras), en el diseño de la estructura de un pavimento flexible. Utilizando los datos de capacidad portante y calidad del material encontrado como óptimo en nuestro estudio.



Figura 4. 31 Tramo Carretero Guadalajara Tepic, MEX-015

Es una carretera de 2 carriles con un Transito Promedio Diario Anual, TPDA de 12,896 vehículos con una tasa de crecimiento del 3% establecido para carreteras de alto tránsito, los factores de distribución por sentido y por carril de diseño, de 0.5 y 1.0 respectivamente, para un periodo de diseño de 20 años, las características de volumen de tránsito y distribución del mismo se obtuvieron de

los datos viales de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT (tabla 4.17), para la estación de aforo denominada “San Cayetano”.

Tabla 4.17 Datos viales de la estación San Cayetano en la red Guadalajara-Tepic

Est. San Cayetano			12,896.00	TDPA			
DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS TECNICOS (DGST)			F. Daño	20 años		30 años	
Vehículo	Comp.	No. Vehículos (Año)		F. Crecimiento	EEA	F. Crecimiento	EEA
A	77.9	3,666,784.16	0.00075	26.87	36,947.95	47.58	65,418.29
B3	1.7	80,019.68	3.158	26.87	3,395,100.69	47.58	6,011,204.90
C2	7.3	343,613.92	3.56	26.87	16,434,801.78	47.58	29,098,683.65
C3	4.9	230,644.96	3.158	26.87	9,785,878.47	47.58	17,326,414.14
T3-S2	5	235,352.00	5.178	26.87	16,372,826.62	47.58	28,988,953.36
T3-S3	1.4	65,898.56	4.339	26.87	3,841,574.84	47.58	6,801,710.93
T3-S2-R4	0.5	23,535.20	4.319	26.87	1,365,667.02	47.58	2,417,985.51
Otros	1.3	61,191.52	4.319	26.87	3,550,734.25	47.58	6,286,762.32
4,707,040.00					54,783,531.62		96,997,133.10

De acuerdo a los datos viales y a la composición vehicular especificada para el tramo de estudio se realizó el calculo del numero de ejes equivalentes para el periodo de diseño, de acuerdo a la siguiente expresion:

$$EEA = TDPA * FS * Fc * Fdaño * 365días * Fcrecimiento$$

Donde:

- EEA: Ejes Equivalentes Acumulados
- TDPA: Transito diario promedio anual
- Fs: Factor de distribución por sentido
- Fc: Factor por carril de diseño
- Fdaño: Factor de daño

Las características de calidad de los materiales utilizados en el diseño se describen en la siguiente tabla 4.18. Los cuales se seleccionaron de acuerdo a la literatura citada que especifica los valores mínimos recomendados para la capas que componen la estructura de los pavimentos, y resaltando principalmente el uso de nuestro suelo mejorado en la capa de subbase, comparándolo con otro diseño donde se utilice en la misma capa de subbase pero con el tepetate natural.

Tabla 4.18 Propiedades de los materiales utilizados para el diseño de pavimento asfáltico

Módulos de las capas	Diseño 1, kg/cm² (Tepetate Natural)	Diseño 2, kg/cm² (Tepetate mejorado)
Módulo dinámico de la carpeta asfáltica	35,690	35,690
Módulo de resiliente de la base granular	3,445	3,445
Módulo de resiliente de la subbase	2,067	8,175
	<i>Tepetate Natural</i>	<i>Tepetate Mejorado</i>
Módulo de resiliente de la subrasante	1,240	1,240
Módulo de resiliente del terreno cimentación	482	482

Se consideró como tepetate mejorado a la dosificación óptima de nuestra mezcla final, en donde se encontró que los valores mejorados de VRS es igual a 77, y respectivo módulo resiliente de 801.74 MPa (8,175 kg/cm²). Para finalmente realizar la comparativa de diseños con tepetate natural y tepetate mejorado.

4.7.2 Diseño UNAM-DISPAV

Se desarrolló el diseño de pavimentos mediante la metodología de la UNAM simplificado en su software denominado Dispav-5 versión 3.0, se realizó para las condiciones de tráfico de la red carretera Guadalajara-Tepic, con las características de calidad de los materiales especificados en la tabla 4.18, comparando la variación de utilizar tepetate natural y el tepetate mejorado que resulta de la presente investigación, ambos enfocados a la capa de subbase del pavimento, detectando las ventajas que representa el material que tiene mayores propiedades de módulo de resiliencia y/o capacidad portante.

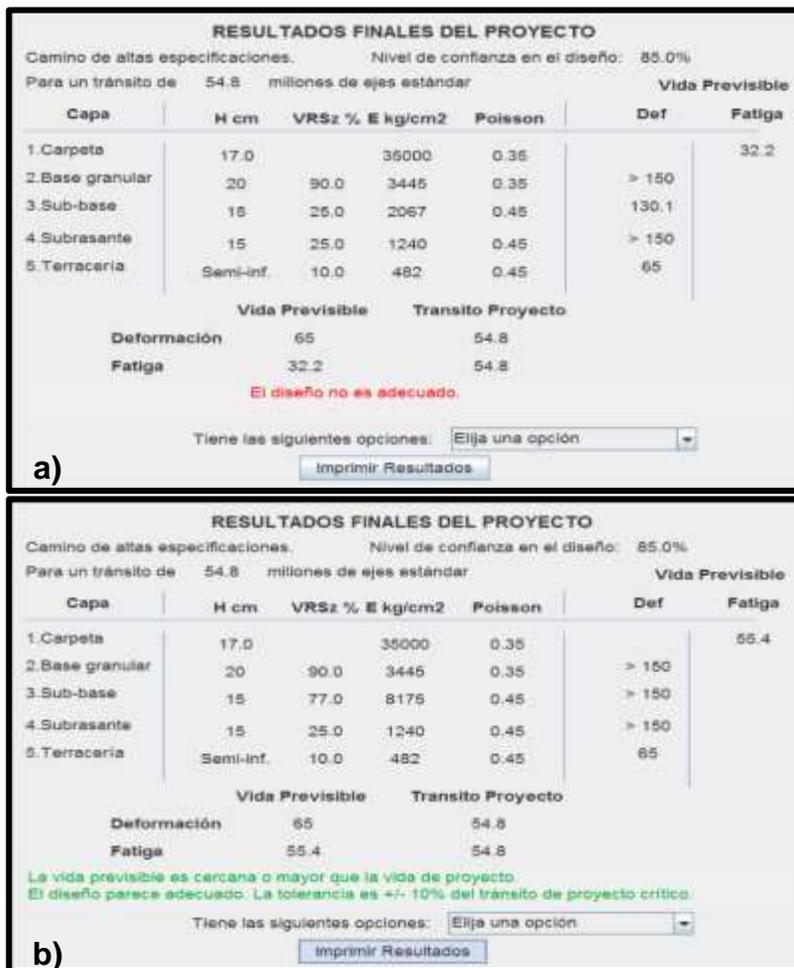


Figura 4. 32 Diseños con Software Dispav, a) Diseño con Tepetate Natural b) Diseño con Tepetate Mejorado.

4.7.3 Diseño IMT-PAVE

Del mismo modo se desarrolló el procedimiento de diseño Semi-empirico de pavimentos flexibles, mediante la metodología de Instituto Mexicano del Transporte, simplificada en su software IMT-PAVE 1.2, para las condiciones que demanda el tramo carretero estudiado, y las características de calidad de los materiales expuestos en la tabla 4.17.

En la primera etapa mostrada en la figura 4.29 se muestra la captura de los datos de tránsito, composición vehicular, y la proyección del tránsito esperado para una vida útil del pavimento en 30 años



Figura 4. 33 Datos de tránsito, IMT-PAVE 1.2

De acuerdo al tránsito proyectado, reflejado en la cantidad de tipos de ejes (sencillo, dual, tándem, tridem) esperados en la vida útil del pavimento considerado de 30 años, se analizan los espectros de carga (figura 4.30) que provocan estos tipos de ejes, para niveles de alta sobre carga, esta consideración es por la situación de los niveles de carga que transitan por nuestra red carretera que se ha comprobado que sobrepasa la carga legal permitida.

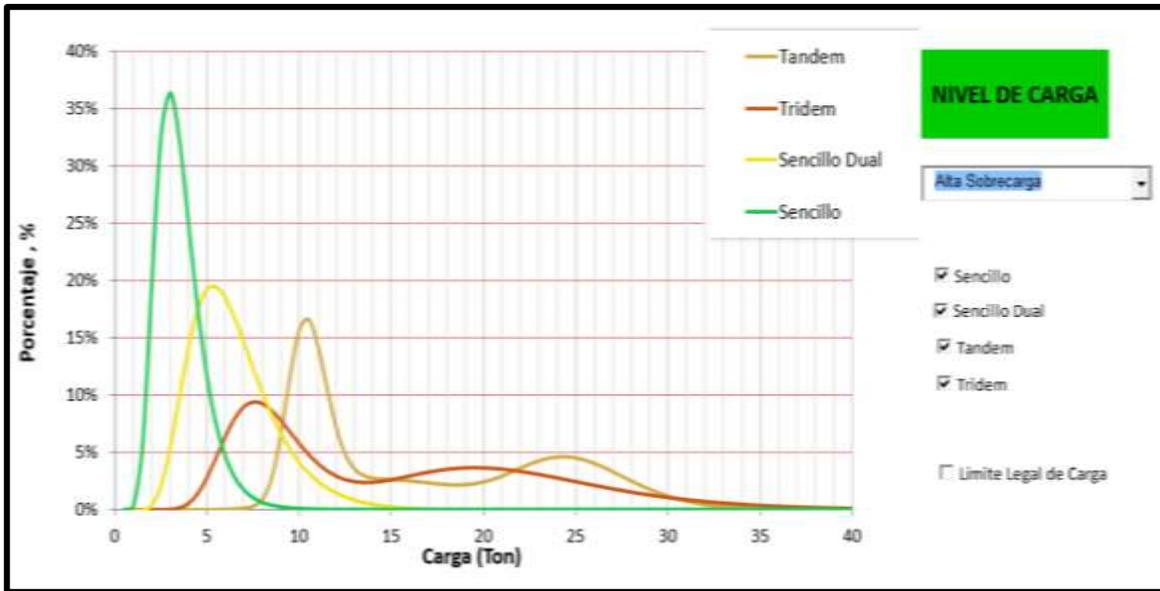


Figura 4. 34 Espectro de carga para una evaluación de nivel de Alta Sobrecarga

Por último se realiza el análisis espectral a partir del cual se estructura nuestro pavimento, partiendo de los módulos resilientes y dinámicos seleccionados, y variando los espesores de las capas, hasta llegar a cumplir con la vida remanente de 30 años que se desea satisfacer en términos de fatiga y deformación permanente, que son los dos tipos de deterioros más problemáticos en los pavimentos flexibles. De este análisis resultan los espesores que deberá tener nuestro pavimento para satisfacer las cargas aplicadas por el tránsito en toda la vida útil.

En la figura 4.31 y 4.32 se muestran los análisis espectrales de tepetate natural y tepetate mejorado respectivamente.



Figura 4. 35 Análisis espectral con el uso de tepetate natural



Figura 4. 36 Análisis Espectral con el uso de tepetate mejorado

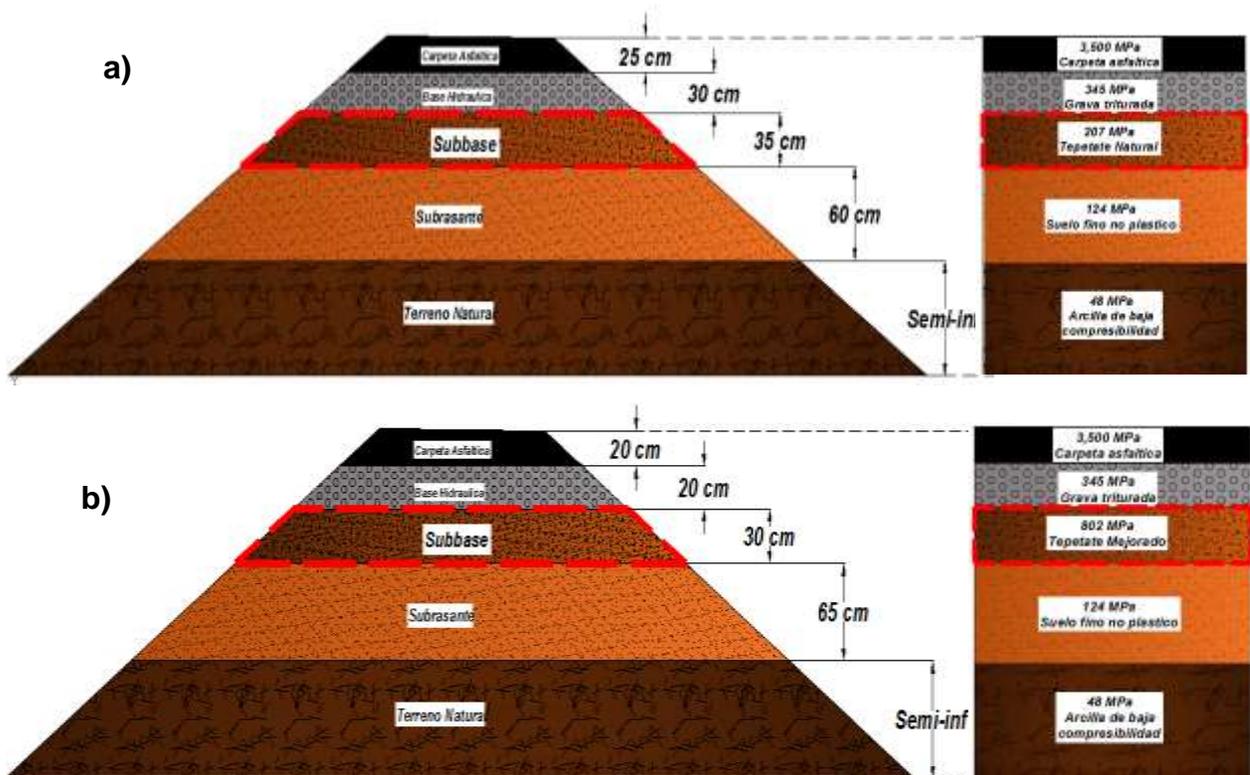


Figura 4. 37 Sección de pavimento resultante a) Tepetate Natural b) Tepetate Mejorado

La figura 4.33 esquematiza de forma clara la composición de las capas del pavimentos para cada uno de los diseños que se plantean en esta comparativa, mostrando la influencia de nuestro mejoramiento de suelo en la disminución de los espesores de las capas, evidenciándose una reducción en 5 cm de carpeta asfáltica, 10 cm de base hidráulica, 5 cm de subrasante, logrado únicamente con utilización de tepetate mejorado en la capa de subbase.

4.7.4 Análisis del beneficio económico

Para mostrar el beneficio económico que refleja este mejoramiento, principalmente como resultado de la disminución de espesores en el pavimento, y consecuente reducción de gastos derivados del mismo. Se realizó una evaluación económica con los dos diseños, mediante un procedimiento de análisis económico planteado por el instituto mexicano del transporte, en donde se calcula el precio de los materiales en función del Módulo E en MPa, como se describe a continuación:

El precio en dólares por m³ de material colocado se calculara en función del módulo E en MPa con la ecuación: **$Precio (P) = 0.0634E + 38$**

Se calculara el costo total (tabla 4.19) de una sección de 10 m de ancho y 1 km de longitud con la ecuación:

$$Costo\ Total = (h_1P_1 + h_2P_2 + \dots + h_nP_{n-1} + P_n) * 10,000$$

Donde h_1, h_2, \dots, h_{n-1} son los espesores de cada capa

Tabla 4. 19 Calculo del Costo total de pavimento

Capas	Tepetate Natural				Tepetate Mejorado			
	Espesor (cm)	Modulo (MPa)	Volumen (m3)	Precio (\$USD/m ³)	Espesor (cm)	Modulo (MPa)	Volumen (m3)	Precio (\$USD)
Carpeta Asfáltica	25	3500	2500	\$259.90	20	3500	2000	\$259.90
Base Hidráulica	30	345	3000	\$ 59.87	20	345	2000	\$ 59.87
Subbase	35	207	3500	\$ 51.12	30	802	3000	\$ 88.85
Subrasante	60	124	6000	\$ 45.86	65	124	6500	\$ 45.86
Terraplén	100	48	10000	\$ 41.04	100	48	10000	\$ 41.04
Costo Total	\$1,693,903.90 USD			\$ 79,285.10 USD	\$ 1,614,618.80 USD			

De acuerdo al presente análisis, se evidencia que la utilización del tepetate mejorado resulta en una disminución de \$79,285.10 USD, que representa el 4.68% respecto costo total si se construye la sección del pavimento con solo tepetate natural.

5. CONCLUSIONES

- La presente investigación resulta en una hipótesis positiva, en la cual se cumple el planteamiento inicial que la cal mejora la resistencia a la compresión y la fibra la resistencia a la tensión, que en acción conjunta muestran una metodología eficaz para aumentar las propiedades mecánicas del tepetate.
- El tepetate es un material muy abundante en nuestro país, cuyo aprovechamiento puede enfocarse a capas del pavimento de mayor relevancia y no solo como material de relleno, mediante un mejoramiento adecuado puede incrementar sus propiedades mecánicas para satisfacer estas necesidades.
- El tepetate analizado cumple con la caracterización general que se tiene de este tipo de materiales, presentando una matriz de arena con limos, se confirma que su resistencia como material compactado es mínimo, resultado en 1.29 kg/cm², permeabilidad baja y no presenta plasticidad.
- Del análisis de la mineralogía del banco se encontraron los minerales Albita, Cuarzo, Anortita y arcilla Montmorilonita la cual provoca la variación en la resistencia de nuestro suelo en comparación al analizado en la tesis de López Lara 2012.
- La cal representa un mejoramiento eficaz para aumentar las propiedades de compresión del tepetate, alcanzando un valor de 30.26 kg/cm², siendo del orden de 23 veces el valor de un tepetate natural. De la etapa de interacción tepetate-cal se concluye que la dosificación que nos proporciona valores óptimos de resistencia es la de 10% de cal.
- Las fibras un mejoramiento eficaz para aumentar las propiedades de tensión del tepetate, alcanzando un valor de 2.92 kg/cm², incrementándose del orden de 14 veces el valor de un tepetate natural. De la etapa de interacción tepetate-fibras se concluye que la dosificación que nos proporciona valores óptimos de resistencia es la de 8% de fibras.

- De la etapa final de interacción de todos los elementos Tepetate-Cal-Fibras se concluye que la dosificación que presenta valores óptimos de resistencia a compresión y tensión, así como de capacidad portante, es la de Tepetate con 10% de Cal- 8% de Fibras.
- La capacidad portante del suelo muestra un aumento significativo alcanzando a incrementarse hasta 3 veces más el valor del tepetate natural.
- En el análisis de los diseños de los pavimentos se refleja la influencia del tepetate mejorado en la disminución de los espesores de las capas que componen la estructura del pavimento y en consecuencia los costos resultantes se verán disminuidos considerablemente.

6. REFERENCIAS

Ahmad, F., Bateni, F., Azmi, M. (2010). "Performance evaluation of silty sand reinforced with fibers". *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 28, pp93–98.

Akbulut, S., Arasan, S., Kalkan, E. (2007), "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers". *Applied Clay Science*. Vol. 38, pp. 23-32.

Arredondo, O. F. (1980). *Estudio de Materiales*. VI. Cerámica y vidrio. Novena Edición. I.E.T.C.C: 161.

Asociación Nacional de fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE) (1997). "Manual de Estabilización de suelos con cal". Madrid.

ASTM C 29-97, (2003). Standard Test Method for Bulk density ("unit weight") and voids in aggregate.

ASTM C136 (2005), Standard Test Method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.

ASTM C496, (2011). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

ASTM D 1557, (2012). Standard Test Methods for Laboratory compaction characteristics of soil using modified effort.

ASTM D 2487, (1993). Standard Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes.

ASTM D 3282 (2004). Classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes.

ASTM D 4318 (1993) Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

ASTM D1883 (1999). Standard Test Methods for CBR (California bearing ratio) of laboratory-compacted soils.

ASTM D2166 (2000). Standard Test Methods for Unconfined compressive strength of cohesive soil.

ASTM D2434-68, (2006). Standard Test Methods for permeability of granular soil (Constant head).

ASTM D698, (2007). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.

ASTM D882, (2002). Standard Test Method for Tensile Properties of thin plastic sheeting.

Ayyar, R., Krishnaswamy, R., Viswanadham, S. (1989). "Geosynthetics for foundations on a swelling clay". Int work on geotex, Bangalore, India.

Babu, G. S., and Vasudevan, A. (2008). "Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil". Journal of Materials in Civil Engineering.

Bárbara, Francisco et al. (1979). "Materiales y procedimientos de construcción". Vol. II. Edit. Herrero S.A., México.

Bertaux, J. and Quantin, P., (1994), Relation géométrique et variations minéralogiques des différents termes d'une séquence d'altération de tufs pyroclastiques de la région de Texcoco (Mexique), en Transactions of the 15 th International Congress of Soil Science: Acapulco, Mexico, 5, 232-233.

Beyerlein, J.I., Zhu, Y.T., Mahesh, S., (2001). On the influence of fiber shape in boneshaped short-fiber composites. Composites Science and Technology 61, 1341–1357.

Brandstetter, J., Kromp, K., Peterlik, H., Weiss, R., (2005). Effect of surface roughness on fraction in fiber-bundle pull-out tests. Composites Science and Technology 65, 981–988.

Chauhan, S., Mittal, S., Mohanty, B. (2008). "Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fiber". Geotext Geomembr;26: 429–35.

Choudhary K., Jha, J., Gill, S. A. (2010). "study on CBR behavior of waste plastic strip reinforced soil". Emirates J Eng Res; 15:51–7.

Consoli, C., Bassani, A., Festugato, L.(2010). "Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils". Geotext Geomembra ;28:344–51.

Consoli, C., Montardo, P., Donato, M., Prietto, M. (2004). "Effect of material properties on the behavior of sand–cement–fiber composites. Ground Improv ;8:77–90.

Consoli, N. C., Casagrande, M. D. T., Coop, M. R. (2005), "Effect of Fiber Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 11, pp 1434-1436.

Consoli, N. C., Heineck, S. K., Casagrande, M. D. T. (2003), "Large Strain Behavior of Polypropylene Fiber- Reinforced Sandy Soil". Proceedings of the 12th Panamerican Conference on Soils Mechanics and Geotechnical Engineering. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos.

Consoli, N. C., Prietto, D. M. P., Ulbrich, A. L. (1998), "Influence of Fiber and Cement Addition on Behavior of Sandy Soil". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol 24, No. 12, pp. 1211-1214.

Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., Fonini, A., Dalla Rosa, F. (2009b), "Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range". Geotextiles and Geomembranes. Vol. 27, pp. 196-203.

Corro S., (1970). "Diseño de pavimentos flexibles. Comportamiento de los tramos experimentales", Instituto de ingeniería, UNAM, informe 240.

Corro S., Prado G., (1999). "Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones", Instituto de ingeniería, UNAM.

Diambra, A., Ibraim, E., Muir Wood, D., Russell, A.R. (2010). "Fibre reinforced sands: Experiments and modeling". Geotextiles and Geomembranes. Vol. 28, pp. 238-250.

Dirección General de Servicios Técnicos (DGST), (2010), "Catalogo de secciones estructurales de pavimentos para las carreteras de la república mexicana", Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

Eades, J.L., and Grim, R.E. (1966). "A Quick test to Determine Lime Requirements for Soil Stabilization". USA.

Elias, V., B.R. Christopher, and R.R. Berg. (2001). FHWA Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes-Design and Construction Guidelines, No. FHWA-NHI-00-043, Federal Highway Administration, USA.

Elias, V., Welsh, J. Warren, J. and Lukas, R. (1999). "Ground Improvement Technical Summaries", Volume II, Publication No. FHWA-SA-98-086, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Etchevers, D.J., Rosa, M., López-Claude, Zebrowski y Peña, D. (1992). "Características químicas de tepetates de referencia de los estados de México y Tlaxcala, México": TERRA 10, 171-182.

Fernández Calvo, C. (2006), Refuerzo de suelos con fibras sintéticas, Asociación Técnica de Carreteras, Comité de Geotecnia Vial.

Flores-Román, D., González-Velázquez, A., Alcalá-Martínez, J.R., y Gama-Castro J.E. (1996). "Duripans in the subtropical and temperate subhumid climate of the Trans-Mexico Volcanic Belt", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 13, no. 2, pp. 228-239.

Flores-Román, D., Alcalá-Martínez, J.R., González-Velázquez, A., y Gama-Castro, J.E. (1991). " Los Tepetates". *Revista 208 de Geografía*, 3(4):37-42, 1991.

Flores-Román, D., Alcalá-Martínez, J, R., González-Velásquez, A., y Gama-Castro, J, E. (1992). "Suelos con fragipán de origen volcánico en clima semicálido y subhúmedo, El caso del Noreste del estado de Morelos": 151-163.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (FAO-PNUMA),. (1980). "Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos": Rome, 86.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993). "Soil Mechanics for Unsaturated Soils. Wiley", New York.

Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Roman, D., Sedov, S., Cabadas-Baez, H., Diaz-Ortega, J., (2007), "Los tepetates y su dinamica sobre la

degradación y el riesgo ambiental: el caso del glacis de Buenavista, Morelos”. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LIX, Num 1, p-133-145.

García, E.A. (1961). “Estudio de los suelos tepetatosos y las posibilidades de recuperación agrícola”: Chapingo, México, Escuela Nacional de Agricultura, Tesis Licenciatura.

Garnica Anguas, P. (2012), “Espectros de Carga y daño para diseño de pavimentos”, Quinta Conferencia Magistral, Alfonso Rico Rodríguez.

Garnica Anguas, P., Correa, A. (2004) “Conceptos mecanicistas en pavimentos”, Publicación Técnica No.258, IMT.

Garnica Anguas, P., Hernández Domínguez, R. (2013), “Manual de usuario IMT-PAVE 1.1”, Documento Técnico No. 53, IMT.

Garnica Anguas, P., Martínez Peña, G.E.I., Prado Cardona, E.J. (2003). “Algunos aspectos de la resistencia a la tensión y fatiga en suelos arcillosos estabilizados con cal”, Publicación Técnica No.230, IMT.

Garnica Anguas, P., Pérez García, N., Gómez López, J.A. (2000), “Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares”, Publicación técnica No. 142, IMT.

Ghavami, K., Filho, R., Barbosa, P. (1999). “Behaviour of composite soil reinforced with natural fibers”. Cement Concrete Compos 1999;21:39–48.

Gosavi, M., Patil, A., Mittal, S., Saran, S. (2004). “Improvement of properties of black cotton soil subgrade through synthetic reinforcement”. J Inst Eng (India);84:257–62.

Gray, D. H., Ohashi, H. (1983). “Mechanics of fiber-reinforcement in sand.” Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol. 109, No.3, pp. 335-353.

Gray, H., Al-Refeai, T., “Behavior of fabric versus fiber reinforced sand”. J Geotech Eng ASCE 1986;112:809–20.

Gregory, G. H. (2006). “Shear Strength, Creep and Stability of FiberReinforced Soil Slopes”. Tesis doctoral, Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University, Estados Unidos.

Grogan, W. P., Johnson, W. G. (1993). "Stabilization of high plasticity clay and silty sand by inclusion of discrete fibrillated polypropylene fibers (Geofibers®) for use in pavement subgrades." US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, CPAR-GL-93-3.

Grupo Calidra, (2007). "La Cal". Capacitación de Construcción. Módulo 1: Información Técnica.

Guerrero C.J. (2001) "Rocas Calizas: formación, ciclo del carbonato, propiedades, aplicaciones, distribución y perspectivas en la mixteca Oaxaqueña", Universidad Tecnológica Mixteca.

Guerrero, E. G., Luna, J. L., y Caballero, E. (1992). "Distribución de los tepetates de la República Mexicana escala 1:4 000 000", Terra 10: 131-136.

Harriette, L. (2004). "The potential of flax fibers as reinforcement for composite materials. Eindhoven (the Netherlands)": Eindhoven University Press.

Hazirbaba, K., Gullu, H. (2010). "California bearing ratio improvement and freeze–thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid" . Cold Reg Sci Technol;63:50–60.

Healan Dan, M. (1989). " Tula of the Toltecs": Excavations and Survey. University of Iowa Press. Vol I, USA.

Heine, K., and Schönhals, E. (1973). Entstehung und Alter der "toba" Sedimente in Mexiko. Eiszeitalter und Gegenwart 23/24, 201-215.

Hidalgo, C., Quantin, P., Zebrowski, C. (1992). "La cementación de tepetates: estudio de la silicificación": TERRA 10, 192-201.

Ibraim, E., Fourmont, S. (2006), "Behavior of Sand Reinforced With Fibres". Proceedings of the Geotechnical Symposium: Soil StressStrain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis. Roma, Italia.

Ingles, O.G., y Metealf, J.B. (1972). Soil stabilization: principles and practice, Butterworths, Sydney.

Jadhao, D. P., Nagarnaik, P. B. (2008). "Influence of Polypropylene Fibers on Engineering Behavior of Soil-Fly Ash Mixtures for Road Construction". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 13.

Kishore, J., Rao, K. (1986). "Moisture absorption characteristics of natural fiber composites". *J Reinf Plast Compos*;5:141–50.

Kumar, A., Walia, B., Mohan, J. (2006). "Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay". *Construct Build Mater* 2006;20:1063–8.

Kumar, S., Tabor, E. (2003). "Strength characteristics of silty clay reinforced with randomly oriented nylon fibers". *EJGE*; 127:774–82.

Li, C. (2005). "Mechanical Response of Fiber-Reinforced Soil". Tesis doctoral, Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin. Estados Unidos.

Li, C. (2009). "Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering". *J Appl Polym Sci* ;83:660–86.

Lindh, E., and Eriksson, L. (1990). "Sand reinforced with plastic fibres, a field experiment." *Performance of Reinforced soil structures*, McGown, A., Yeo, K., and Andrawe, K.Z, editors, Thomas Telford, proceedings of the international reinforced soil conference held in Glasgow, Scotland, September 1990, 471-473.

Llerena, L.D. (1947). "El distrito de conservación del suelo y agua de Chapingo, México": Chapingo, México, Escuela Nacional de Agricultura, tesis de licenciatura.

Lopes, M.L., Ladeira, M., (1996). "Influence of the confinement, soil density and displacement rate on soil-geogrid interaction". *Geotextiles and Geomembranes* 14, 543–554.

López-Lara, T., Hernández-Zaragoza, J.B., Horta-Rangel, J., Rojas, E., López-Cajún, C., and Ramirez, G.J. (2011). "Sustainable use of Tepetate composite in earthen structure".

López-Lara, T., Hernández-Zaragoza, J.B., Horta-Rangel, J., Rojas, E., López-Cajún, C., and Rosales Hurtado, D.(2012). "Tepetate as construction material".

López-Lara, T., Hernández-Zaragoza, J.B., Horta-Rangel, J., Rojas, E., and Rosales Hurtado, D. (2013). "Geocharacterisation of the tepetates".

López-Lara, T., Hernández-Zaragoza, J.B. and López-Cajún, C. (2005). "Useful Lifetime and suitable thickness of soil lime mixture", Journal of Geotechnical Engineering.

López-Lara, T., Hernández-Zaragoza, J.B., Pérez-Rea, M.L., López-Cajún, C. and Castaño, M.V. (2006). "Reaction kinetics of an expansive soil stabilized with Calcium Oxide", Research Journal of Chemistry and Environment. 10(1):55-57.

Makiuchi, K., Minegishi, K. (2001)."Strain-induced toughness and shearing characteristics of short-fiber reinforced soils". In: Int sym on earth reinf, Fukuoka, Japan.

Mendoza Diaz, A., Gutierrez Hernandez, J.L. (1994) "Análisis económico de los efectos del peso de los vehículos de carga autorizados en la red nacional de carreteras", Publicación Técnica No. 52, IMT.

Michalowski, R. L., Cermak, J. (2003). "Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. Vol. 129, No. 2, pp. 125136.

Miehlich, G. (1984). Chronosequenzen und anthropogene Veränderungen andesitischer Vulkanische böden in drei Klimastufen eines rantropiscchen Gebirges (Sierra Nevada de Mexico). Hebil. Schrift, Fachber. Geowiss, Univ. Hamburg, BDR. 402 p.

Miehlich, G. (1992). Formation and properties of tepetate in the central highlands of Mexico: TERRA 10, 137-144.

M-MMP-1-01/03, (2014). "Métodos de Muestreo de materiales para terracerías", Normativa SCT.

M-MMP-1-03/03, (2014). “secado, disgregado y cuarteo de muestras”, Normativa SCT.

Munfakh, G.A., and Wyllie, D.C. (2000). “Ground Improvement Engineering-Issues and Selection”, An International Conference of Geotechnical & Geological Engineering, November 2000, Melbourne, Australia.

National Lime Association (NLA), (2004). “Manual de estabilización de suelo tratado con cal. Estabilización y modificación con cal”. Boletín 326, , Arlington, USA.

Newman, K., White, J. (2008). “Rapid assessment of cement/fiber stabilized soil using roller-integrated compaction monitoring”. In: Trans Res Board, 87th annual meeting, Washington, DC.

Nimlos, T.J.(1990). “Morphology, genesis and classification of soils formed over Mexican tepetate”. Soil survey horizons 30 (3): 72-77.

Nom-CMT-4-02-001/11, (2011). “Materiales para Subbases”, SCT.

Parka, T., Tan, A. (2005). “Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber”. Geotext Geomembr;23:348–61.

Poetsch, T. (2004). “Forms and dynamics of silica gel in a tuff-dominated soil complex”: Results of micromorphological studies in the Central Highlands of Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 21 (1), 195-201

Puppala, J., Musenda, C. (2000). “Effects of fiber reinforcement on strength and volume change behavior of expansive soils”, trans res boa. In: 79th Annual meeting, Washington, USA.

Quantin, P. (1992). Étude des sols volcaniques indurés “tepetates” des bassins de México et Tlaxcala, en uue de leur réhabilitation agricole, Rapport scientifique final, contrat CEE/ORSTOM TS2-0212, p. 77 .2

Quintana Rondon, H. A., Reyes Lizcano, F.A. (2007). “Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones”.

Rama, R.R., Rahardjo, H., and Fredlund, D.G. (1988). "Closed-Form Heave Solutions for Expansive Soils". *Journal of Geotechnical Engineering*. 114(5):573-588.

Rico, A., Del Castillo, H. (1982). *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Vol. II*. Edit. Limusa, México.

Rico Rodríguez A., Téllez Gutiérrez R., Garnica Anguas P., (1998), "Pavimentos flexibles. Problemática, Metodologías de diseño y Tendencias", *Publicación Técnica No. 104*, IMT.

Rodriguez, M. (2006). Compressed-earth-block walls in Mexico and Honduras. *Environmental Impact on Housing and Construction Innovations*, 13(2):18-20.

Rodríguez, S., Gutiérrez-Castorena, M.C., Hidalgo, C., y Ortiz-Solorio, C.A. (1999). "Intemperismo en Tepetates y en cenizas volcánicas y su influencia en la formación de Andisoles": *TERRA*, 17, 97-108.

Rosales Hurtado, D. (2011). "Caracterización de los Tepetates usados como material de sustitución en la ciudad de Querétaro".

Rowell, M., Han, S., Rowell, S. (2000) "Characterization and factors effecting fiber properties". *Nat Polym Agr Compos*:115–34.

Salazar, L. (1938), *Elementos de Geología: Universidad Nacional Autónoma de México* pp. 192-33.

Sampedro Rodríguez, A. (2005). "Tratamientos de suelos con cal, planteamiento general, diseño y control de calidad". *C/Goya*, 23, 3ºDcha.

Santoni, R. L., Tingle, J. S., Webster, S. L. (2001). "Engineering properties of sand –fiber mixtures for road construction." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 3, pp. 258-268.

Sarzalejo A. G., Rossi B., Perri G., Winterberg R., Perri R.E. (2005), "Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón", *Manual Técnico MACCAFERRI*.

Sauer, W. (1965): Geologia del Eciindor, Editorial Ministerio de Educación, Quito, 383 p.

Sayyed, M.H., Mohammad, S., Sayyed, M. A., Ali, Z. (2011) “ A Simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fiber”.

Segetin, M., Jayaraman, K., Xu, X.(2007). “Harakeke reinforcement of soil–cement building materials”: manufacturability and properties. Build Environ;42:3066–79.

Sobhan, K., Mashnad, M. (2002). “Tensile strength and toughness of soil–cement–fly ash composite reinforced with recycled high density polyethylene strips”. J Mater Civil Eng ASCE;14:177–84.

Swamy, N. (1984). New reinforced concretes. Surry University Press.

Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., Cai, Y. (2007). “Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil”. Geotextiles and Geomembranes. Vol. 25, pp. 194-202.

Tang, C., Shi, B., Zheng, L. (2010). “Interfacial Shear Stregth of fiber reinforced soil”. Geotextiles and Geomembranes. Vol. 28, pp.54-62.

Terashi, M., and Juran, I. (2000) “Ground improvement-State of the Art.” GeoEng 2000, Volume I: Invited papers, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA, 461-519.

Thevanayagm, S., Martin, G.R., Shenthana, T., Liang, J. (2001). “ Post-Liquefaction pore pressure dissipation and densification in silty soils.

Tingle, S., Santoni, S., Webster, L. (2002). “Full-scale field tests of discrete fiber-reinforced sand”. J Trans Eng ASCE;128:9–16.

Tutumluer, E., Kim, I., Santoni, L. (2004). “Modulus anisotropy and shear stability of geofiber-stabilized sands”. Trans Res Rec;1874:125–35.

Vasudev, D. (2007) Performance studies on rigid pavement sections built on stabilized sulfate soils. Msc thesis, University of Texas at Arlington.

Vera, R.; López, R. (1986). "El origen de la cangahua, en Paisajes geográficos", No 16, Quito,p. 21-28.

Vera, R., Lopez, R. (1992). "Tipología de la cangahua", en Terra, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991, ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México,p. 113-119.

Vidal, J., Osorio, R. (2002). "Modulo Resiliente de Suelos Finogranulares" Revista Universidad EAFIT No. 125.

Viswanadham, S. (1989). "Bearing capacity of geosynthetic reinforced foundation on a swelling clay master of technology dissertation". Madras (India): Indian Institute of Technology; 1989.

Williams, BJ. (1972). "Tepetate en el Valle de México". Anales de la Asociación de Geógrafos Americanos, Wiley.

Yusoff, M., Salit, M., Ismail, N., Wirawan, R. (2010). Mechanical properties of short random oil palm fiber reinforced epoxy composites. Sains Malay;39:87–92.

Zebrowski C. (1992). "Los suelos volcánicos endurecidos de América Latina". *Terra Latinoamérica*, vol. 10,pp.15-23.

Zhang, M. X., Javadi, A. A., Min, X. (2006). "Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions". *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 24, pp. 201-209.