



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARACTERIZACIÓN DE LOS "TEPETATES"
USADOS COMO MATERIALES DE SUSTITUCIÓN
EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A

DAVID ROSALES HURTADO

Querétaro, Qro., Septiembre del 2011.



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Licenciatura en Ingeniería Civil

**CARACTERIZACIÓN DE LOS "TEPETATES" USADOS COMO
MATERIALES DE SUSTITUCIÓN EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO.**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Ingeniero Civil

Presenta:

David Rosales Hurtado

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara.

SINODALES

Dra. Teresa López Lara

Presidente

_____ Firma

Dra. Ma. De la Luz Pérez Rea

Sinodal

_____ Firma

Dr. J. Jesús Alonso Mota

Sinodal

_____ Firma

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Sinodal

_____ Firma

Suplente

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Septiembre del 2011
México

ÍNDICE

RESUMEN	1
SUMMARY	2
1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	4
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	7
1.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS.	9
1.3 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL <i>TEPETATE</i>	9
2 ORIGEN Y USOS DEL <i>TEPETATE</i>.....	13
2.1 ORIGEN GEOLÓGICO DEL <i>TEPETATE</i>	13
2.2 LOS <i>TEPETATES</i> EN LA CONSTRUCCIÓN.	14
2.3 LOS <i>TEPETATES</i> EN LA AGRICULTURA.....	15
2.4 BANCOS DE MATERIALES.	17
2.4.1 <i>Exposición general</i>	17
2.4.2 <i>Situación de los bancos de tepetate en Querétaro</i>	21
2.5 MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS.	23
2.5.1 <i>Exposición general</i>	23
2.5.2 <i>Sustitución</i>	25
2.5.3 <i>Impermeabilización</i>	29
2.5.4 <i>Remoldeo</i>	29
2.5.5 <i>Inundación</i>	29
2.5.6 <i>Aislamiento</i>	30
2.5.7 <i>Sobre excavación</i>	30
2.5.8 <i>Desplante profundo de la cimentación</i>	30
2.5.9 <i>Estabilización química</i>	30
3 METODOLOGÍA	33
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	35
3.2 DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS DE LABORATORIO.	36
3.2.1 <i>Procedimientos previos</i>	36

3.2.2	<i>Peso Volumétrico Seco Suelto</i>	39
3.2.3	<i>Granulometría</i>	39
3.2.4	<i>Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad y clasificación por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)</i>	42
3.2.5	<i>Prueba Proctor Estándar</i>	46
3.2.6	<i>Prueba para determinar la resistencia a compresión simple</i>	50
3.2.7	<i>Determinación de coeficiente de permeabilidad mediante permeámetro de carga variable.</i>	52
4	RESULTADOS	56
4.1	LOCALIZACIÓN DE LOS BANCOS DE TEPETATE.	56
4.2	DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO SUELTO (PVSS). .	57
4.3	DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL.	57
4.4	LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y CLASIFICACIÓN POR MEDIO DEL SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS).	60
4.5	COMPACTACIÓN MEDIANTE LA PRUEBA PROCTOR ESTÁNDAR.	62
4.6	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (Q_u). .	63
4.7	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD	64
4.8	RESUMEN	65
5	CONCLUSIONES	67
6	BIBLIOGRAFÍA	69
A N E X O S	74

RESUMEN

El *Tepetate* es un material terroso de características inertes, es decir que no presenta alteraciones en su volumen por cambios de humedad, por lo que no provoca problemas de agrietamiento bajo las construcciones. Este material es usado frecuentemente en la Industria de la Construcción de la región Central de México. Los terraplenes o plataformas para pavimentos y cimentaciones para diferentes edificaciones se construyen con este material, también se usa como material de sustitución de suelos problemáticos como los expansivos para asegurar la estabilidad de las cimentaciones así como en la elaboración de elementos de construcción tales como blocks, tabiques, etc. Actualmente y desde hace muchos años, el *tepetate* se extrae de diferentes bancos de materiales regionales y su identificación se basa solamente en sus características de consistencia y de color. Por tal situación, se han reportado problemas porque han mostrado comportamientos diferentes al esperado. Por consiguiente, esta investigación consistió en la caracterización geotécnica del material denominado *tepetate* partiendo de sus propiedades índice y mecánicas con el objetivo de comenzar a identificarlo de manera formal y universal y poder establecer los requerimientos mínimos que debe cumplir como material inerte en la construcción. Los *tepetates* estudiados se extrajeron de una gran cantidad de los bancos que actualmente existen y que se encuentran en la periferia de la Cd. de Querétaro (Qro., México). Una vez realizado el estudio, se concluyó que el 80% de los bancos muestreados, son SM (Arena limosa) con un contenido aproximado de 70% de arenas, 20-30% de finos y 10% de gravas o menos con una distribución granulométrica semejante y uniforme en un rango de valores, con poca o nula plasticidad, con resistencia promedio de 0.9 kg/cm^2 y con una permeabilidad considerada como baja que oscila entre 10^{-6} - 10^{-9} m/s. El 80% de los bancos cumplen con las propiedades de baja o nula plasticidad lo que los hace inertes, más no impermeables.

Palabras clave: *Tepetate*, caracterización, bancos de material, suelo, limo, arena.

SUMMARY

The *tepetate* is an earthy material with inert characteristics, this is, it does not have changes in volume due to variations in humidity, so it does not present cracking problems under the construction. This material is often used in the construction industry in the central region of México. Terraces or platforms for pavements and foundations for different buildings are made out of this material, it's also used as a material in soils replacement for problematic soils, such as the expansive, to ensure the foundations stability; it's also used for the development of construction elements like bricks. This material is frequently used and has several applications in the construction industry, such as pavement embankment and foundations for different buildings. Today and since too many years, the *tepetate* has been extracted from different regional banks materials and its identification it's based only in characteristics like color and consistency. For this situation, there have been reports of problems because it has shown different behavior than expected. Therefore, this research is a geotechnical characterization of the material called *tepetate* based on its index and mechanical properties in order to start its formal and universal identification and to establish the minimum requirements to met as an inert material. This study covers most of the *tepetate* banks located in the north of the City of Querétaro (Querétaro, México). Once the study was finished, it was concluded that the 80% of the *tepetate* banks were classified as SM (silty sand) containing approximately 70% of sand, 20-30% of fine grained soil and 10% or less of gravel, with a similar and uniform granulometric distribution in a range of values, with a low or null plasticity, with average strength of 0.9 kg/cm^2 and an average low permeability of 10^{-6} m / s . 80% of the *tepetate* banks satisfy the property of low or null plasticity which make them inert, but not impervious.

Key words: *Tepetate*, inert material, characterization, material banks, soil, silty sand.

***En una época de engaño universal,
decir la verdad es un acto revolucionario.***

-George Orwell

1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El *tepetate* es considerado un material inerte, el cual es ampliamente conocido en la región central de México. Este material es frecuentemente usado en la industria de la construcción desde hace muchos años, en terraplenes para pavimentos o como material de sustitución. El *tepetate* suele ser clasificado por los campesinos mediante su color y dureza, como *tepetate* blanco (el más duro), *tepetate* amarillo (el menos duro) y *tepetate* rojo (de dureza media) (Nimlos y Ortiz, 1987). Sin embargo, hasta hoy no se ha definido qué es en realidad este material y no se cuenta con mucha información acerca del tema, al menos no de sus propiedades físicas y mecánicas, (importantes en la Ingeniería Civil) ya que hay una gran cantidad de información acerca de sus propiedades agrológicas (importantes para la agronomía), ya que desde tiempos prehispánicos, se ha tratado de incorporarlos a la agricultura, fragmentándolos y abonándolos (Rodríguez-Tapia, 2004; Velázquez-Rodríguez *et al*, 2001); así como estudios de su taxonomía (Williams y Ortiz, 1981), de su clasificación y origen geológico (Nimlos, 1990; Flores-Román, *et al* 1992). Este estudio pretende definir al *tepetate* en base a su caracterización geotécnica. Debido a la existencia de suelos expansivos en la región, el *tepetate* se utiliza como material de sustitución ya que es considerado como un material inerte. Desde el punto de vista geológico, el *tepetate* es considerado como un horizonte endurecido, ya sea compactado o cementado, que se encuentra comúnmente en los paisajes volcánicos de México, subyaciendo a suelos o bien aflorando en superficie. De características físicas y mecánicas tales como alta densidad, baja conductividad hidráulica y baja retención de humedad (Gama-Castro *et al*, 2007).

El *tepetate* es el nombre común en México que se les da a las tobas pomosas o tobas calcáreas, y es un material de construcción muy empleado en el país a causa de su bajo precio y ligereza, de cohesión muy corta, su peso volumétrico es de 1200 kg/m^3 en promedio, variando con su composición. Los

yacimientos de las tobas son numerosos y se hallan en todos los terrenos inmediatos a los de origen volcánico en toda la extensión del país (Bárbara *et al*, 1979).

Esta investigación fue realizada en la ciudad de Santiago de Querétaro, (Querétaro, México). Ubicado con las coordenadas geográficas de latitud igual a 20°35'15"N, longitud 100°23'34"W y con una altitud media sobre el nivel del mar de de 1820 m. El cono urbano de la ciudad de Querétaro está compuesto además por los municipios de Corregidora y El Marqués. Para el presente proyecto se extrajeron muestras en distintos bancos de material existentes en la periferia del cono urbano de la zona norte, suroeste y sureste, específicamente en los lugares conocidos como Tlacote (T), Jurica (J), Conín (C), el Batán y el Jaral (estos últimos ubicados en el municipio de Corregidora, Querétaro).

En la zona de Tlacote se extrajo *tepetate* de tres bancos distintos, el mismo caso fue para la zona de Conín, mientras que para la zona de Jurica fueron dos bancos los muestreados, y solo un banco para la zona del Batán y el Jaral.

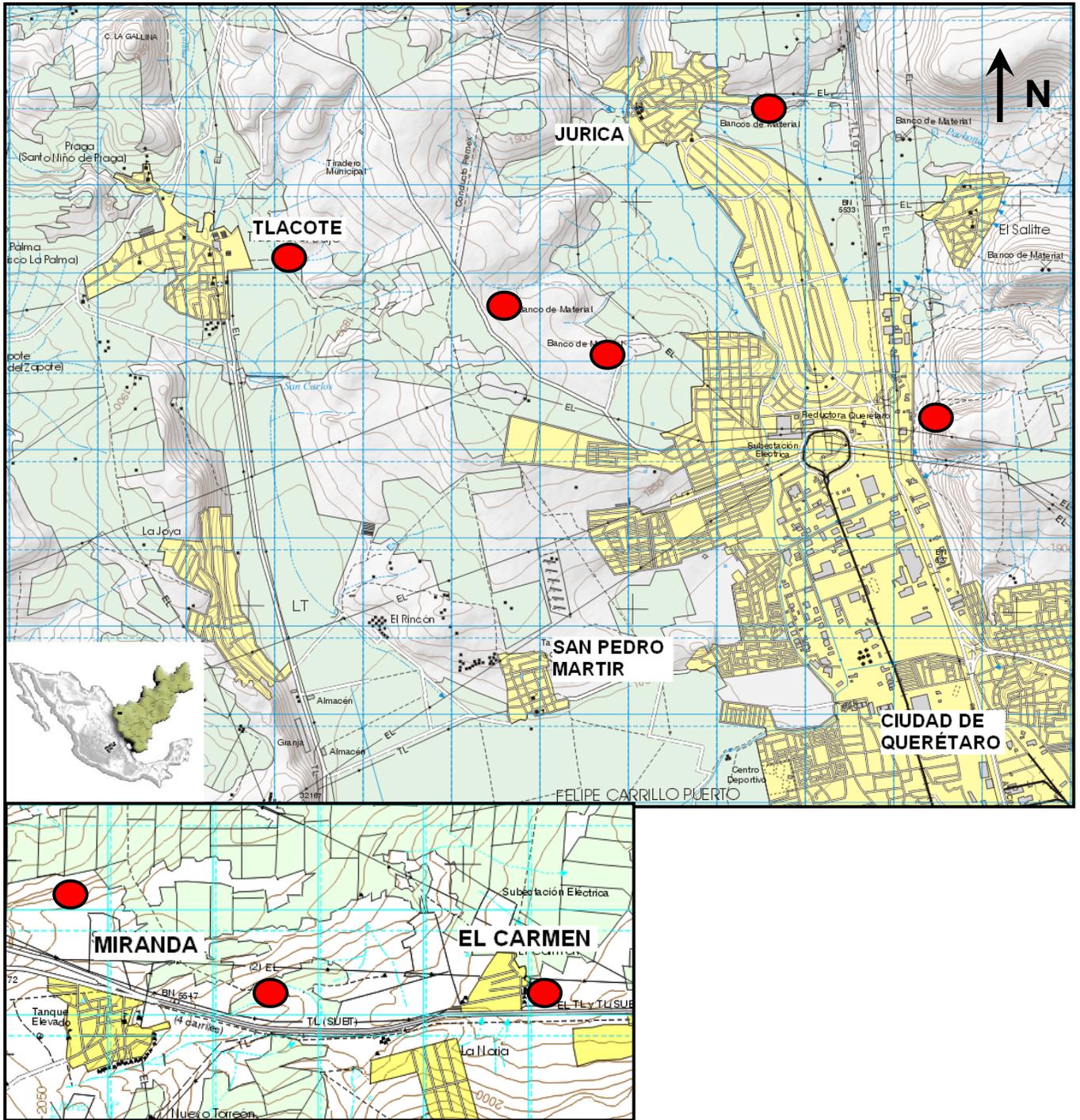


Figura 1.1 Ubicación del área de estudio.

1.1 Descripción del problema.

En la Ciudad de Querétaro (Qro., México) es muy utilizado el *tepetate* como material para sustitución de suelo expansivo, dado que este suelo no cumple los requisitos necesarios para la construcción de alguna obra civil. Dentro de los métodos de mejoramiento de suelos expansivos está el método de mejoramiento por sustitución, que consiste en el remplazo del suelo original por otro inerte que cumpla las características deseadas.

El *tepetate* se extrae de diferentes bancos, lo que hace que sus propiedades físicas y mecánicas sean diferentes, por lo que los parámetros de permeabilidad y plasticidad también variarán y con ello el comportamiento de este como material de sustitución. Si consideramos la existencia de arcillas expansivas en la zona, al utilizar el método de sustitución se tendría que utilizar un material que evite el flujo de agua para evitar cambios volumétricos en capas inferiores. Es por eso que el uso de este material como material de sustitución de suelo no siempre representa en realidad una solución que nos garantice la omisión de los problemas de estabilidad volumétrica en las capas inferiores.

Actualmente no se cuenta con mucha información acerca de las características y propiedades de los *tepetates* existentes en la Ciudad y en el país, lo cual es un problema ya que éstos se están utilizando sin que se tenga una certeza de sus propiedades mecánicas e hidráulicas.

Es frecuente que el ingeniero encuentre no adecuados en algún sentido los suelos que ha de utilizar para un determinado fin, en un lugar específico. Este hecho abre tres posibilidades de decisión:

- Aceptar el material tal como lo encuentre, pero tomando en cuenta objetivamente su calidad en el diseño efectuado.
- Eliminar el material insatisfactorio o prescindir de usarlo, substituyéndolo por otro de características adecuadas.

- Modificar las propiedades del material existente, para hacerlo capaz de cumplir mejores requerimientos.

La última alternativa da lugar a las técnicas de estabilización de suelos (Rico, 1982).

Dentro de la historia, todas las antiguas civilizaciones desarrollaron métodos útiles de mejoramiento de suelos y muchos testimonios de su creatividad sobreviven hoy en día. Una mezcla compacta de arcilla y limo fue usada en la construcción de las pirámides de Shensi en la meseta Tibetana-Mongola hace alrededor de 5000 años. Un relleno de arcilla, polvo de piedra caliza y cuarzo fue usado por los egipcios en la pirámide de Zoser en el 3000 A.C. Los mayas construyeron caminos con una base fuerte de pedazos de caliza con una granulometría bien graduada, mientras que la superficie fue cubierta con un mortero de limo y tierra blanca finamente tamizada. En épocas más recientes es hasta el siglo XX que se profundiza más en el mejoramiento del suelo (Mitchell, 1982).

Una de las alternativas de mejoramiento de suelos más comunes es la Sustitución. En la Ciudad de Querétaro (Qro., México) y sus alrededores es característico el uso del *tepetate* como material de sustitución de suelo expansivo. Por lo anterior es necesario que este material cumpla las características necesarias de resistencia, impermeabilidad y de estabilidad volumétrica.

La identificación de los *tepetates* es muy importante debido a que son ampliamente usados y no se cuenta con mucha información que defina sus características y sus propiedades mecánicas e hidráulicas. Por lo anterior, esta Investigación pretende aportar la Caracterización geotécnica del *tepetate* de varios bancos que se encuentran en la periferia de la Cd. de Querétaro, (Querétaro, México); dicha caracterización también ayudará a identificar si dicho material tiene las propiedades que requiere como material inerte.

1.2 Objetivos e hipótesis.

Objetivos:

Determinar la composición general del material regional denominado *tepetate*.

Caracterizar geotécnicamente los diferentes *Tepetates* utilizados en la sustitución de suelos expansivos y construcción terracerías y de subbases para pavimentos en la Ciudad de Querétaro, a través de la determinación de sus propiedades mecánicas e hidráulicas, así como clasificarlo mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Determinar cuál o cuáles son los más recomendables para usarse como materiales de sustitución.

Hipótesis:

El *tepetate* con mayor contenido de arena es el menos recomendable para usarse como material de sustitución de suelos expansivos, ya que tendrá un coeficiente de permeabilidad alto lo que permitirá al agua infiltrarse con una velocidad mayor y llegar a estratos con posible actividad expansiva.

Sin embargo, cabe mencionar que la hipótesis es aplicable cuando se trate de evitar la infiltración, ya que en términos de estabilidad mecánica es recomendable utilizar materiales con menor cantidad de finos.

1.3 Antecedentes históricos del *tepetate*.

El término *tepetate* es utilizado en México, para designar a depósitos o estratos de material volcánico endurecido. Este término proviene del náhuatl *tepetlatl* (*Xido en lengua Otomí*) que a su vez es formado de las raíces *tetl*=Piedra y *petlatl*=estera, que podría ser traducido como *petate* (estera) de piedra (Simeón, 1885). Los aztecas clasificaron a los *tepetates* como una variedad de tipo de suelo, aparentemente contaban con suficiente capacidad ingenieril para clasificarlo de acuerdo a sus características físicas (Figura 1.2). En sus registros

de tenencia de tierra (aparecen en documentos históricos como el Códice Vergara, Códice Santa María Asunción) ya eran ampliamente identificados como suelos de baja fertilidad agrícola y desde entonces, se ha tratado de incorporarlos a la agricultura, fragmentándolos y abonándolos (Rodríguez-Tapia, 2004).

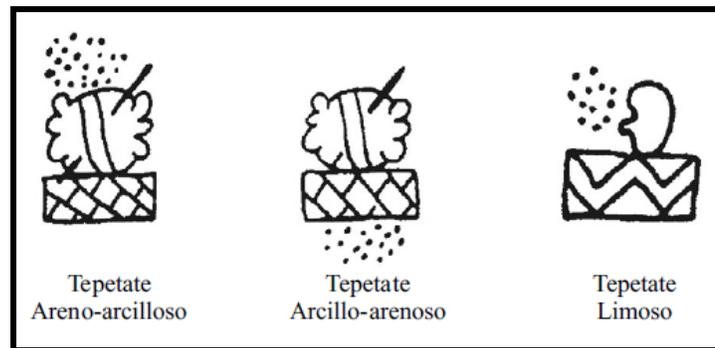


Figura 1.2 Manera gráfica por la cual los aztecas clasificaban distintos tipos de *tepetate*, (Códice Vergara, Siglo XVI).

El *tepetate* se contaba dentro de sus materiales y era considerado un suelo de caliche o aluvión de color café amarillento formado bajo la superficie por depósitos de limo. También en muchas locaciones está expuesto a la superficie debido a la erosión de los suelos que los cubrían dando así lugar a paisajes áridos y en apariencia sin posibilidad de uso (Gibson, 1996).

Desde un aspecto geológico el *tepetate* se refiere a un horizonte endurecido, ya sea compactado o cementado; se encuentra comúnmente en los paisajes volcánicos de México, subyaciendo a suelos o bien aflorando en superficie. Su presencia, representa un problema desde el punto de vista del manejo agrícola, ya que presentan varias limitantes como una dureza extremadamente alta, bajos contenidos de materia orgánica así como algunas propiedades químicas de los mismos, dificultan la labranza, siendo costosa la rehabilitación de estas capas endurecidas .

Por otro lado, los *tepetates* debajo de suelos, producen discontinuidades litológicas, impiden la infiltración del agua y favorecen el escurrimiento lateral, marcando una superficie en donde se promueven los

deslizamientos. Asimismo, el *tepetate* puede favorecer la erosión e impedir la recarga de acuíferos (Gama-Castro *et al*, 2007).



Figura 1.3 *Tepetates* en América Latina, con sus respectivos nombres vernáculos acorde al país de origen.

Los *tepetates* han sido reportados en diferentes países principalmente en América Latina (Figura 1.3) en los cuales son denominados con diferentes nombres, tales como *silcrete* en los E.U.A.; *talpetate* en Nicaragua; *hardpan*, *duripan* y *cangahua* en Colombia y Ecuador; *cancagua*, *moromoro*, *tosca* y *ñadis* en Chile, *hardpan* en Perú y *kora* y *masa* en Japón (Zebrowski, 1992).

En México se estima que aproximadamente el 30% del territorio nacional se ve afectado (desde el punto de vista de producción agrícola) por la presencia de estos materiales ya sea en un grado mayor o menor (Figura 1.4). A modo general se encuentran regularmente ubicados en climas secos, en especial el semiárido y en altitudes comprendidas entre los 1800 m.s.n.m. y los 2800 m.s.n.m. (Gama-Castro *et al*, 2007).m

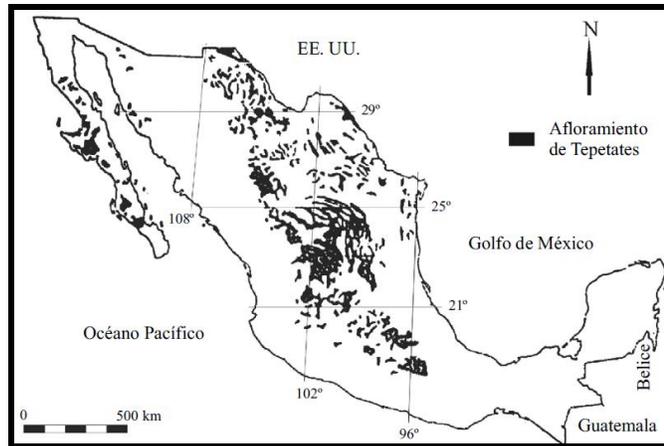


Figura 1.4 Ubicación de *tepetates* a lo largo de la República Mexicana, Gama-Castro (2007).

La extensión de estas formaciones no se conoce con exactitud. Existen algunos inventarios realizados en ciertos países, los cuales permiten determinar su extensión.

En México, mapas pedológicos elaborados por el INEGI hacen mención de los suelos volcánicos que presentan un horizonte duro en profundidad. La planimetría de estas formaciones indica que cubren una superficie de 30,700 km². En el centro de México los *tepetates* ocupan una área mayor a 300 mil ha, siendo una superficie importante (Navarro-Garza *et al*, 2004).

En los países de América que miran al Pacífico, incluyendo México, los países de América Central, y los países de América del Sur, los suelos volcánicos cubren una superficie de 1,376,000 km², es decir, 23.2% del área que ocupan dichos países (casi 6 millones de km²).

Dado su origen los *tepetates* presentan propiedades variables. Son de gran importancia en la Ingeniería Civil como material de construcción, son utilizados ampliamente en la construcción de caminos en la base o la sub-base, pero también son de gran importancia al momento de ser utilizados como material de sustitución.

2 ORIGEN Y USOS DEL *TEPETATE*

2.1 Origen geológico del *tepetate*.

Algo que nos puede hablar del origen geológico de los *tepetates* y de los suelos volcánicos endurecidos en general es una simple confrontación de los mapas climatológicos con la localización de estos, lo que nos muestra que la mayoría de estos últimos están situados en regiones de clima relativamente seco.

En México, destacan igualmente las estrechas relaciones entre zonas climáticas y la distribución de los *tepetates* (Miehlich, 1984; Dubroeuq *et al.*, 1989; Nimlos, 1990). Estos últimos aparecen en el altiplano mexicano únicamente bajo una pluviometría total anual inferior de 800-900 mm. Los *tepetates* ricos en carbonato de calcio se localizan en zonas con precipitación inferior a 650-700 mm.

La determinación de los materiales originales es fundamental en todo estudio de formaciones volcánicas endurecidas. De acuerdo a diferentes autores, el origen de dichos materiales puede ser muy variable; depósitos eólicos de tipo loess, lahares pero son sobre todo las cenizas y lapillis, bajo forma de lluvias aéreas, no cementadas en el momento de depositarse, o bajo forma de flujos piroclásticos (cineritas, tobas y brechas) los que son comúnmente citados como origen de estas formaciones. Generalmente, algunas rocas piroclásticas se señalan como *tepetates*. La toba cristalina andesítica es considerada como *tepetate* (Rodríguez-Tapia, 1999)

Se debe restar importancia e incluso ignorar el origen eólico (tipo loess), ya que en México se establece que el aspecto bimodal de curvas granulométricas no resulta del transporte eólico del material, sino que más bien son el resultado de la alteración de las cenizas volcánicas (Miehlich, 1991).

Los diferentes procedimientos mencionados para explicar el endurecimiento de los suelos volcánicos son variados.

El primero corresponde a una serie de fenómenos de compactación, sea por simple compactación o por transportación de los materiales en el agua.

Un segundo mencionado con mayor frecuencia, corresponde a un endurecimiento de los materiales en el momento de su depósito (es el caso de los flujos piroclásticos que se endurecen al enfriarse). La alteración pedológica posterior al depósito contribuye, en general, a ablandar el horizonte inicialmente endurecido.

Un tercero menciona que el endurecimiento puede obtenerse mediante procedimientos pedológicos, que aporten elementos en solución, como cementantes de naturaleza ferruginosa, calcárea o silíceo (Zebrowski, 1992).

Sin embargo, a través de análisis macro y micromorfológicos, mineralógicos, físicos y químicos, se ha revelado que las tobas se están transformando a arcillas, por procesos de intemperismo, no endureciéndose.

2.2 Los *tepetates* en la construcción.

El *tepetate* es un material terroso, con un alto porcentaje de arenas y finos, el cuál es muy utilizado en la industria de la construcción debido a que se considera como un material inerte, lo que evita alteraciones volumétricas.

Uno de los usos más comunes que tiene es en las vías terrestres, como terraplén o plataforma para pavimentos y cimentaciones para diferentes edificaciones ya que éste es utilizado para sustituir a suelos problemáticos. También es muy utilizado en la construcción de vivienda donde suele ser utilizado como base para pisos, también es utilizado en la confección de bloques para la construcción de muros, donde puede ser denominado en ocasiones como sillar.

Dada su escasa capacidad agrícola no es apto para la siembra a menos que se le mejore mediante la adición y mezcla de suelos con aptitud agrícola,

algunos de los procedimientos para su adecuación agrícola son mencionados en el subcapítulo siguiente.

Dado que el *tepetate* es muy utilizado en la construcción de subbases para pavimentos, debe cumplir con ciertos requisitos de calidad (características granulométricas, índice de plasticidad, valor soporte de California, etc.). Los requisitos están definidos en ciertos rangos que variarán en función de la intensidad de tránsito en términos del número de ejes equivalentes acumulados de 8.2 t esperados durante la vida útil del pavimento (SCT, 2004).

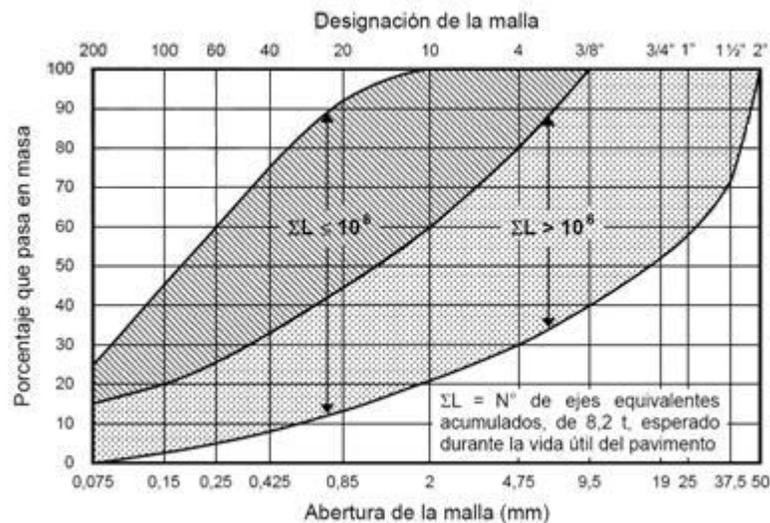


Figura 2.1 Zonas granulométricas para subbases (SCT, Norma N-CMT-4-02-001/04).

La Figura 2.1 muestra las zonas granulométricas recomendables para los materiales que van a ser utilizados como subbases.

2.3 Los *tepetates* en la agricultura.

Como ya se ha mencionado en México, se le llama *tepetate* a una variedad de materiales de dureza intermedia, entre suelo y roca, sin aptitud para la agricultura, fragmentándolos y abonándolos. Los suelos volcánicos representan un potencial innegable para la agricultura. Los suelos endurecidos constituyen una excepción dentro de los suelos volcánicos ricos, por el hecho de haber sido

cultivados sin las debidas precauciones y por lo tanto erosionados. Se trata de suelos que presentan horizontes endurecidos que pueden estar situados a profundidades variables. En numerosas regiones, la erosión de las tierras ha sido tal, que las capas de suelos superiores se han perdido poniendo al descubierto los horizontes endurecidos ocasionando zonas erosionadas poco propicias para la agricultura.

La erosión de dichos suelos es particularmente grave; sin embargo, no se dispone de ninguna cifra referente a los *tepetates* puestos a descubierto por la erosión. En ciertos estados de la República Mexicana, la extensión ocupada por los *tepetates* es elevada; por ejemplo, en el estado de Tlaxcala estos últimos cubren el 54% de su superficie.

La reincorporación de zonas erosionadas no es reciente. Se practicaba en la época prehispánica y desde hace más de 100 años los tlaxcaltecas lograban la recuperación de las zonas con *tepetate* en dos años, con base en cultivos de haba y ayocote, el primer año, y de maíz, el segundo (Hernández, 1987).

En la actualidad, la rehabilitación de las zonas volcánicas endurecidas y erosionadas se realiza de diferentes modos. Las técnicas tradicionales de los campesinos (con empleo del pico) muy generalizadas, han sido poco a poco reemplazadas por técnicas modernas que emplean nivelación y roturación profunda. La roturación es necesaria con el fin de mullir las capas endurecidas; se practica comúnmente por medio de un subsoleo y, posteriormente, de una labranza con el fin de romper los bloques que quedan después del subsoleo y, posteriormente, de una labranza con el fin de romper los bloques que quedan después del subsoleo. El tamaño final de los agregados es importante, ya que las partículas deben ser suficientemente finas para no obstaculizar la emergencia de las plantas y suficientemente gruesas para evitar la asfixia. El tamaño de los agregados deben estar comprendidos entre 0.5 y 0.8 mm para que los suelos cuenten con un conjunto de propiedades ideal en lo que se refiere a la aireación y a la capacidad de retención de agua (Braunack y Dexter,

1989). Las lluvias y los métodos de cultivo repetidos reducen el tamaño de los agregados con el paso de los años.

Las medidas para la rehabilitación de suelos se han asociado con frecuencia con intentos de reforestación porque es costumbre considerar las tierras más degradadas como no aptas para cultivos anuales pero sí para el establecimiento de especies forestales. Otra medida es la aplicación de abonos orgánicos, bajo forma de estiércol, aunque en realidad esto es en la mayoría de los casos incompatible con la realidad socioeconómica del mundo campesino. La reincorporación de los *tepetates* a la agricultura implica la elaboración de terrazas con el fin de disminuir la erosión, sin embargo a pesar de que se han realizado numerosas medidas (De Noni *et al*, 1986; Arias y Figueroa, 1990) no hay ninguna norma o información técnica que establezca con precisión la pendiente mínima que deban tener las terrazas elaboradas sobre las formaciones rehabilitadas.

2.4 Bancos de materiales.

2.4.1 Exposición general.

Los bancos de material son importantes en la construcción y mantenimiento de vías terrestres, presas, diques de tierra, etc. Uno de los costos más importantes de este tipo de obras corresponde a los materiales: roca, grava, arena y suelos. Es por esto que su localización y selección se convierte en uno de los problemas básicos del ingeniero civil, en conexión estrecha con el geólogo. Si se localizan bancos aptos cercanos a la obra se pueden abatir los costos de transportación que suelen ser de los que más afectan los totales. La localización es de tal importancia que no puede considerarse completo un proyecto o digno de autorización para su ejecución, si no contiene una lista completa y detallada de los bancos de materiales de los que han de salir los suelos y las rocas que formen la obra.

Localizar un banco es más que descubrir un lugar en donde exista un volumen alcanzable y explotable que pueda emplearse en la construcción y que satisfaga las especificaciones de calidad requeridas así como los requerimientos de volumen del caso. El problema tiene otras muchas implicaciones. Ha de garantizarse que los bancos elegidos son los mejores entre todos los disponibles en varios aspectos que se interrelacionan. En primer lugar, en lo que se refiere a la calidad de los materiales extraíbles, juzgada en relación estrecha con el uso a que se dedicarán. En segundo lugar, tienen que ser los más fácilmente accesibles y los que se puedan explotar por los procedimientos más eficientes y menos costosos. En tercer lugar, tienen que ser los que produzcan las mínimas distancias de acarreo de los materiales a la obra, aspecto cuya repercusión en los costos es de las más importantes. En cuarto lugar, tienen que ser los que conduzcan a los procedimientos constructivos más sencillos y económicos durante su tendido y colocación final en la obra, requiriendo los mínimos tratamientos. En quinto lugar, los bancos deben estar localizados de tal manera que su explotación no conduzca a problemas legales de difícil o lenta solución y que no perjudiquen a los habitantes de la región, produciendo injusticias sociales. También es muy importante que estén localizados fuera de zonas arqueológicas e históricas o ecosistemas donde existan especies en algún estado especial, respecto a asentamientos humanos se considera pertinente que se ubiquen a distancias mayores a 2 Km (Instituto de Ecología, 1998).

En cualquier caso práctico, muchos de los requisitos anteriores estarán en contraposición y la labor del ingeniero consiste en elegir un el conjunto de bancos que cumplan de la mejor manera los requisitos antes mencionados.

Durante muchos años la detección de bancos de materiales dependió de métodos exploratorios comunes. En épocas más recientes los estudios geofísicos, de gran potencialidad en estas cuestiones, han venido a sumarse a la técnica disponible, ahorrando mucho tiempo, esfuerzo humano y exploración. Estos últimos métodos pueden auxiliarse a su vez por la fotointerpretación,

método sin rival para explorar grandes áreas a bajo costo. Además con un estudio fotointerpretativo se pueden obtener los siguientes datos: Localización, tipos de roca y posible aprovechamiento (ladrillos, caliza para cal y cemento, roca para mampostería, etc.), espesor de despalme, manera de cómo explotar el banco, acceso a la explotación, entre otros (INEGI, 2005).

Bien sea que se utilice como único método de detección o como complemento de un estudio de fotointerpretación, el reconocimiento terrestre del futuro banco es indispensable (Figura 2.2).

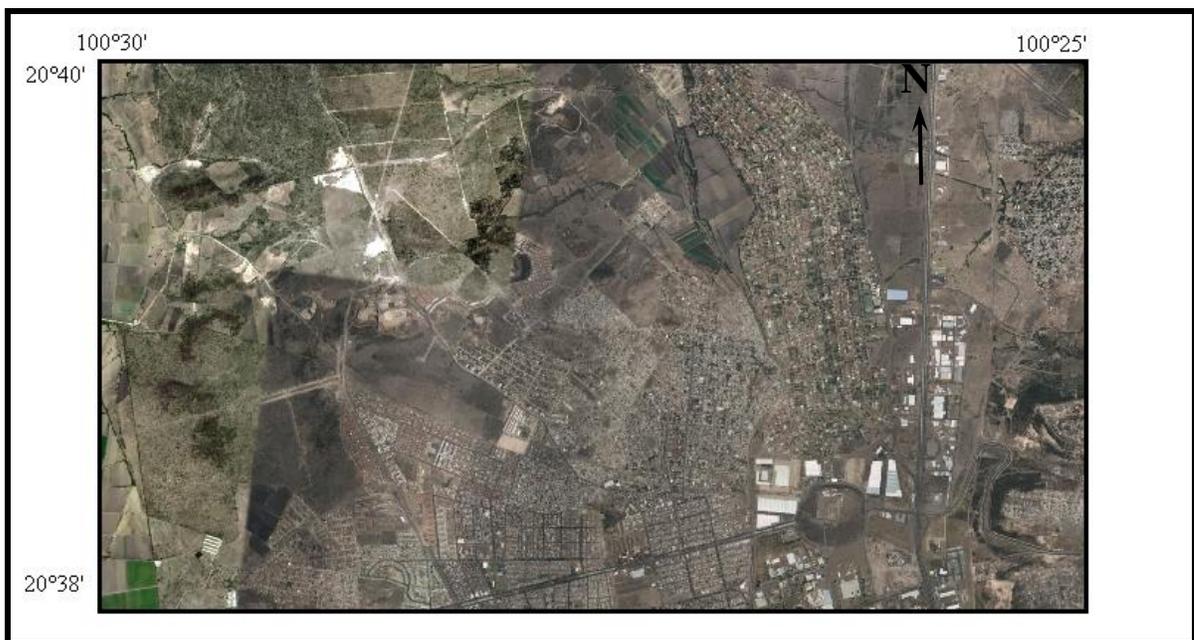


Figura 2.2 Imagen satelital de la zona de estudio, para utilización en fotointerpretación.

Comúnmente es necesario localizar bancos para material de terracerías, para capa subrasante, para sub-base y base de pavimentos y para carpeta, en el caso de carreteras. En ferrocarriles, habrán de localizarse bancos para terracería, capa subrasante, sub-balasto y balasto. En aeropistas, las necesidades se enlistan igual que para carreteras. En añadidura, podrán requerirse bancos para la obtención de los materiales necesarios para la elaboración de concretos, de piedra para mampostería u otros especiales.

Sobra decir que muchas veces, un mismo banco puede proporcionar material para varios de esos usos, sometiendo su producto a diferentes tratamientos.

Los bancos para terracerías en general abundan y son fáciles de localizar, pues para ese fin sirven casi todos los materiales que sean económicamente explotables (Figura 2.3).



Figura 2.3 Explotación lateral en un banco de *tepetate*.

Los bancos para subrasante suelen encontrarse en los oteros bajos y extendidos, en formaciones de roca muy alterada, en las zonas limo arenosas de los depósitos de ríos, en zonas de depósito volcánico de naturaleza piroclástica, como conos cineríticos o tobáceos, en horizontes arenosos de formaciones estratificadas extensas, etcétera.

Un punto fundamental en la determinación de bancos de materiales es la valuación de las rocas o suelos contenidos, lo que requiere la realización de pruebas de campo y laboratorio sobre los materiales que forman el banco en estudio. La valuación preliminar de los suelos se hace sobre todo con base en experiencia precedente; la clasificación en el Sistema Unificado ayuda en todos los casos, pues este sistema lleva aparejado al encasillamiento en un grupo determinado, todo un conjunto de índices de comportamiento.

Los bancos de suelo han de muestrearse para conocer en el laboratorio las características que interesen para definir o autorizar su uso. La muestra que

se extraiga dependerá de la utilización que pretenda hacerse del suelo. Para terracerías, es común realizar análisis granulométricos, límites de plasticidad, pruebas de compactación, cálculo del coeficiente de variación volumétrica, suele requerir entre 50 y 100 kg. Se trata sencillamente de clasificar al suelo y conocer sus características en cuanto a compactación.

Para pavimento, además de las pruebas anteriores, los bancos de suelos deberán sujetarse en general a pruebas de Valor Relativo de Soporte o similar.

En general, las pruebas que requieren los suelos, aunque sea las mismas que las de las terracerías, suelen hacerse con más acuciosidad y en mayor número; por ejemplo, una granulometría en material para terracería muchas veces no va más allá de la separación de las proporciones de gravas, arenas y finos, en tanto que los materiales para pavimentos requieren la curva completa.

Generalmente las pruebas están divididas en tres tipos, las de clasificación, calidad de los materiales y pruebas de diseño.

2.4.2 Situación de los bancos de *tepetate* en Querétaro.

Como se mencionó en la sección anterior, los bancos de materiales son muy importantes en la realización de proyectos de obra civil. Se debe realizar un estudio previo para encontrar él o los bancos que sean más cercanos y que los materiales cumplan con las características de proyecto, sin embargo, la explotación de bancos en Querétaro suele ser una actividad dinámica y en ocasiones puede ser hasta informal. Entidades públicas como la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) han enfocado sus esfuerzos en realizar ejercicios como el “Inventario de bancos de materiales 2008”, el cual es un compendio de los bancos de materiales existentes en todas las entidades federativas, en donde se puede encontrar información básica sobre localización y aprovechamiento de bancos de materiales pétreos para construcción y mantenimiento de carreteras. Este inventario muestra conceptos

aprovechables, tales como el tipo de material, posible utilización, posible o posibles tratamientos que requieran, si requiere explosivos para su extracción así como la ubicación del mismo banco, ahorrando tiempo y esfuerzo tanto para el proyectista como al contratista.

Actualmente existen dos dependencias federales que regulan y aprueban la explotación de bancos de materiales, las cuales son la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SEDESU). La SEMARNAT es la que aprueba el cambio de uso de suelo, trámite que se hace necesario para poder explotar un banco de materiales de manera legal. La SEDESU es el organismo que otorga las licencias de explotación de bancos (también otorga las licencias a bancos de tiro controlado), es en este organismo donde se cuentan con registros de los bancos de materiales aprobados más no existentes, ya que como se mencionó esta es una actividad en ocasiones informal. En los lugares más alejados a los centros urbanos, dueños de parcelas explotan esporádicamente sus tierras, teniendo una venta no regulada de material, ya que los trámites necesarios no son realizados.

De acuerdo a la SEDESU, actualmente existen 259 bancos de todo tipo de materiales con licencia en todo el estado de Querétaro, siendo 76 los que entre sus materiales extraen *tepetate*. De estos 76 bancos de *tepetate*, 36 bancos están ubicados en el municipio de Santiago de Querétaro. Sin embargo, un recorrido mostró que muchos de estos bancos a pesar de tener licencia vigente han sido abandonados, ya sea por diferentes cuestiones como el término del volumen explotable o haber llegado a la colindancia con la parcela del propietario contiguo.

2.5 Métodos de mejoramiento de suelos.

2.5.1 Exposición general.

Se entiende por mejoramiento de suelos al procedimiento mecánico y artificial mediante el cual se busca obtener un material que cumpla con los requerimientos mínimos de resistencia, permeabilidad y estabilidad volumétrica (Zepeda *et al*, 2004). Debe insistirse en que la estabilización no es una herramienta ventajosa en todos los casos y, desde luego, no es siempre igualmente ventajosa en las situaciones en que pueda resultar conveniente; por consiguiente, habrá que guardar siempre muy claramente en mente el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación entre lo que se logrará al mejorarlas, el esfuerzo y dinero que en ello habrá de invertirse, también recordar que la técnica de mejoramiento que mejore un suelo podría perjudicar a otro. Sólo balanceando cuidadosamente estos factores podrá llegarse a un correcto empleo de la estabilización de suelos.

A continuación se da una breve descripción de las propiedades del suelo más susceptibles a ser mejoradas (Rico, 1982):

- Estabilidad volumétrica.

Se refiere por lo general a los problemas relacionados por los cambios de humedad. Se entiende por suelo expansivo como aquel que es susceptible de sufrir cambios volumétricos por cambios de humedad. Puede decirse que los suelos expansivos son un fenómeno que se origina por la presencia de un suelo arcilloso con mineral montmorilonita y un clima semiárido, donde la evotranspiración potencial media anual es mayor que la precipitación media anual (Zepeda *et al*, 2004). Una gran parte de movimientos estructurales ha sido atribuida a suelos expansivos.

La estabilización suele ofrecer una alternativa de tratamiento para estos suelos, diferente del uso de cargas, capas permeables, introducción de agua, etc., que forman la gama de líneas de acción más usual. Se trata de transformar

la masa de arcilla expansiva bien sea en una masa rígida o en una masa granulada, con sus partículas unidas por lazos suficientemente fuertes como para resistir las presiones internas de expansión. Esto se logra por tratamientos químicos o térmicos. La experiencia, muy orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas más profundas.

- Resistencia.

Existen varios métodos de estabilización que se han revelado útiles para mejorar la resistencia de muchos suelos. Todos estos métodos parecen perder mucho de su poder en el momento en que se tienen grandes cantidades de materia orgánica. La compactación es una forma de estabilización mecánica a la que se recurre para incrementar la resistencia de los suelos.

- Permeabilidad.

No suele ser muy difícil modificar substancialmente la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como la compactación, la inyección, etc. En materiales arcillosos, el uso de defloculantes puede reducir la permeabilidad también significativamente, el uso de floculantes aumenta correspondientemente el valor de la permeabilidad. En términos generales, y eliminando la estabilización mecánica, los métodos de estabilización para influir en la permeabilidad de los suelos suelen estar bastante desligados de los métodos con los que se busca variar la estabilidad volumétrica o la resistencia.

- Compresibilidad.

La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos, sin embargo, no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad y, de hecho, puede decirse que todos los métodos de estabilización tienen influencia en dicho concepto.

- Durabilidad.

Suelen involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico. No existen tantos criterios de campo o laboratorio que permitan establecer con seguridad cuál va a ser la durabilidad de un suelo estabilizado y éste es un motivo que contribuye a que el concepto durabilidad sea de los más difíciles de analizar, por lo menos cuantitativamente.

Son muchos los procedimientos que pueden seguirse para lograr esa mejoría de las propiedades del suelo (frecuentemente será posible utilizar tratamientos que mejoren simultáneamente varias de esas propiedades), con vistas a hacerlos apropiados para algún uso en específico. A continuación se describen brevemente algunos de los procedimientos (Zepeda *et al*, 2004):

2.5.2 Sustitución.

Una solución simple y fácil para zapatas y losas de cimentación desplantadas en suelos expansivos consiste en sustituir el suelo de cimentación con suelos no expansivos. La experiencia indica que si el subsuelo está formado por una capa de más de metro y medio de suelos granulares (SC-SP), desplantada sobre suelos altamente expansivos, no hay peligro de movimientos en las cimentaciones cuando la estructura está colocada sobre los suelos granulares. La mecánica y el camino de las aguas superficiales filtradas a través de la capa superior del suelo granular no es clara. Se ha concluido que puede ser que el agua filtrada nunca llega al suelo expansivo o que su expansión es tan uniforme que los movimientos estructurales no se notan.

Esto no es cierto para los rellenos hechos por el hombre. Por razones económicas, la extensión del relleno seleccionado debe limitarse a un máximo de 3 metros más allá de la línea de construcción. Por lo tanto, la posibilidad de filtraciones por los límites del relleno existe. No se ha establecido ninguna pauta en cuanto al requisito de espesor del relleno seleccionado, sin embargo se insiste en un mínimo de 1 metro, aunque sería preferible de 1.5 metros. Esta

magnitud se refiere al espesor del relleno seleccionado bajo la parte inferior de las zapatas o las losas de cimentación.

Los requisitos pertinentes que se deben considerar para la sustitución del suelo son el tipo de material con el que se hará el relleno así como la profundidad y la extensión a las que se realizará la sustitución.

– Tipo de material

Evidentemente, el primer requisito para la sustitución de suelos es que este no sea expansivo. Todos los suelos granulares que van de los GW (grava bien graduada) a SC (arena arcillosa) en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos pueden cumplir el requisito de no expansividad. Sin embargo, en suelos tipo GW y SP el agua superficial puede viajar libremente a través del suelo y causar humedecimiento en los suelos expansivos a mayor profundidad. En el otro extremo, suelos de clasificación SC con un alto porcentaje de arcillas plásticas pueden presentar potencial expansivo. El siguiente criterio mostrado en la Tabla 2.1 ha sido utilizado con un cierto grado de éxito:

Tabla 2.1 Criterios para elección de suelos de sustitución.

Límite líquido (%)	% que pasa malla N°200
Mayor a 50	15-30
de 30 a 50	10-40
Menor a 30	5-50

Cada vez es más difícil encontrar materiales que cumplan los requisitos de la Tabla 2.1 en áreas con suelos expansivos. Si es necesario, el requisito de impermeabilidad puede ser dejado de lado. Cualquier relleno seleccionado será satisfactorio mientras no sea expansivo. Además, las pruebas de expansividad son el único método confiable para determinar la expansividad de un material. En caso de duda, tales pruebas deber realizarse en lugar de confiar en las pruebas de plasticidad.

Se ha dado un gran énfasis a la posibilidad de mezclar los suelos granulares con los suelos expansivos del sitio, lo que reduce la cantidad del material de relleno requerido. Teóricamente, este método es razonable, pero en la práctica es difícil incorporar los suelos granulares con arcillas expansivas secas y duras. Roturadores y aradores serán necesarios para romper la arcilla en terrones de tamaño razonables, lo cual probablemente lo volverá un método tan caro como los métodos de estabilización química.

– Profundidad de la sustitución.

La profundidad de influencia es una cuestión más complicada que debe ser respondida cuando se lidia con el tratamiento del suelo debajo de las cimentaciones. ¿A qué profundidad debe ser compactado el suelo natural?, ¿Cuántos metros cúbicos del material de sustitución deben ser requeridos? Estas preguntas no pueden ser inteligentemente respondidas hasta que la cantidad de movimiento que pueda ocurrir bajo las cimentaciones pueda ser determinada.

En teoría la cantidad de expansión puede ser evaluada de datos derivados de las pruebas de expansión y de los métodos de distribución de presiones. Se ha concluido que las expansiones reales en campo son de solo un tercio de las estimadas de los resultados de las pruebas de laboratorio (Gizienski y Lee, 1965).

También se puede señalar lo siguiente:

- 1.- El potencial de levantamiento vertical de una masa de suelo bajo condiciones de saturación uniforme, puede ser menor a aquel de la misma masa de suelo solo bajo saturación local. El humedecimiento uniforme tiende a igualar el levantamiento.
- 2.- Definitivamente hay una ganancia en cimentar la estructura sobre una capa de suelos no expansivos. Incluso si el suelo más profundo se expande, el movimiento será más uniforme y consecuentemente más tolerable.

3.- La profundidad del relleno seleccionado no deberá ser menor a 1 m y preferiblemente a 1.2 m. El potencial de expansión bajo el relleno es muy importante como los cambios de las condiciones de densidad y humedad en lugares diversos. Se debe remarcar que con 1.2 m de relleno más el peso del concreto, una presión uniforme de aproximadamente 3 t/m^2 es aplicada a la superficie del suelos expansivo. Para suelos moderadamente expansivos, tal sobrecarga puede ser importante en prevenir el potencial expansivo.

4.- La falla del método de sustitución generalmente ocurre durante la construcción. Si la excavación se moja excesivamente antes de la colocación del relleno ya que el agua atrapada causará expansión. El ingeniero geotecnista debe tener la oportunidad de supervisar la colocación del relleno o tal método no se debe adoptar.

5.- El espesor del relleno puede ser reducido si se combina la compactación del suelo original y el método de sustitución.

6.- El grado de compactación del relleno seleccionado depende del tipo de estructura a soportar. Para losas de cimentación el 90% de la prueba Proctor estándar debería ser adecuado. Para zapatas un grado de compactación del 95% al 100% debe ser alcanzado (Chen, 1988).

– Extensión de la sustitución

La principal razón por la que el relleno artificial seleccionado es menos efectivo que una capa natural de suelo granular es que en condiciones naturales, la capa se extiende sobre un área larga, mucho más larga que en la condición artificial. En una situación de relleno artificial, siempre es posible que el agua superficial se infiltre a los estratos más profundos de suelos expansivos por los bordes del mismo. Por lo tanto, entre más área de extensión, más efectivo el relleno.

Con la tecnología actual en suelos expansivos, la sustitución del suelo es el mejor método para obtener un suelo para cimentación estabilizado. Las

siguientes son evaluaciones para el método de sustitución de suelos (Chen, 1988):

- 1.- El costo de la sustitución del suelo es relativamente barata comparada con la estabilización química. No se requiere maquinaria de construcción especial.
- 2.- La capa de suelo granular también sirve como una barrera efectiva contra la elevación de las aguas subterráneas o por ascensión capilar.
- 3.- Drenaje superficial alrededor del edificio debe ser mantenido propiamente para que el agua no tenga oportunidad de llegar a los suelos expansivos debajo del relleno seleccionado.

2.5.3 Impermeabilización.

Se trata de utilizar recubrimientos plásticos y asfálticos entre la cimentación y el suelo para impedir el aumento del contenido de agua del terreno de apoyo, en general es difícil asegurar que el terreno permanecerá realmente protegido (Trejo, 1986).

2.5.4 Remoldeo.

Este método consiste en remoldear cierto espesor de suelo (romper su estructura) y volverlo a colocar compactado a humedad mayor que la original con un peso volumétrico menor que el que tenía en su estado original. El sobresaturar el suelo podría traer como consecuencia cambios radicales en la naturaleza física del suelo, afectando sus propiedades mecánicas (Romero-Cervantes y Pérez-Rea, 2008).

2.5.5 Inundación.

El pre humedecimiento del suelo por medio de la técnica de la inundación se ha utilizado algunas veces para minimizar el cambio volumétrico del suelo, su objetivo es tratar de aumentar el contenido de agua del suelo hasta el valor representativo de la condición de equilibrio. Una vez que se concluya la obra, debe hacerse notar que este tratamiento no es eficaz si el

suelo de cimentación está sujeto al secado y humedecimiento repetidos. Además, cuando se utilice este método se recomienda que se lleve a cabo un análisis previo del grado de saturación logrado para prevenir principalmente asentamientos y, por consiguiente, una disminución del esfuerzo cortante.

2.5.6 Aislamiento.

Consiste en asilar el terreno de pérdidas o aumentos de humedad, esto se logra mediante la construcción de banquetas, pavimentos, drenaje y barreras. Las banquetas se construirán en el perímetro de las estructuras, las cuales deben tener el ancho de una vez y media la profundidad de la capa activa, debe asegurarse que las banquetas no se agrieten para que no se permita el paso de agua. También son usadas membranas impermeables.

2.5.7 Sobre excavación.

Este método consiste e sobre excavar la sección de trabajo en la cimentación y el espacio generado se rellena con material inerte en cantidad suficiente como para impedir la expansión por el peso del relleno. La utilidad del método depende del potencial de expansión del suelo.

2.5.8 Desplante profundo de la cimentación.

La influencia atmosférica sobre la deformación del subsuelo disminuye gradualmente con el aumento de la profundidad, la cimentación se puede desplantar hasta el nivel en el que el cambio de humedad sea imperceptible. Esta profundidad de desplante generalmente es de 1.2 a 1.5 m.

2.5.9 Estabilización química.

Se realiza generalmente con el fin de obtener uno de los siguientes mejoramientos del suelo:

- Aumento de la resistencia y la durabilidad.
- Impermeabilización del suelo.

- Disminución del potencial de cambio de volumen del suelo debido a una contracción o una expansión.
- Manejabilidad del suelo.

Entre los aditivos que pueden utilizarse se incluyen el cemento, la cal, los materiales bituminosos, etc. Las sales han sido estudiadas, con fines de estabilización, desde hace varias décadas, entre las que se pueden citar el cloruro de potasio, el cloruro de magnesio, cloruro de bario, nitrato de sodio, carbonato de sodio, cloruro de calcio, cloruro de sodio, entre otros, sin embargo, solo algunas de ellas, por razones económicas, han podido ser aplicadas a la estabilización de terracerías. Particularmente, el cloruro de sodio por su bajo costo, es de los que más se han empleado en carreteras, en algunos casos con mayor o menor éxito dependiendo de las condiciones particulares del caso que se trate (*Garnica et al, 2002*).

Existen otros métodos como la estabilización por mezclas de suelo como el limo que reduce drásticamente el índice plástico y aumenta el límite de contracción de las arcillas montmoriloníticas (Holtz, 1969), estabilidad por drenaje, por medios eléctricos (como electroósmosis y pilotes electro metálicos), por calor y calcinamiento, por mencionar algunos.

La compactación del suelo es el proceso mediante el cual el suelo es mecánicamente comprimido a través de una reducción de su relación de vacíos. Se mide en términos de la densidad en seco o la cantidad de materia sólida por unidad de volumen. Para una cantidad constante de compactación, todos los suelos tienen un contenido de humedad óptimo y un peso volumétrico máximo. En el campo, la compactación se realiza por diferentes tipos de rodillos o vibradores. Uno de los principales laboratorios británicos recomienda el uso de vibro-compactadores de rodillo liso para compactación de suelos granulares, para compactación de suelos arcilloso húmedos los compactadores neumáticos de cansancio y para los suelos secos arcillosos los rodillos tipo pata de cabra (Williams, H. P., 1983).

La aplicación de drenajes prefabricados verticales combinados con vacío y la precarga es considerada como una de las técnicas de mejora más respetuosas del medio ambiente dentro de los métodos de mejoramiento de suelo. La presión atmosférica natural se utiliza para generar la succión a través de una bomba de vacío. En comparación con otros métodos mejoramiento de suelo tales como los pilotes profundos, este método no sólo ahorra un gasto sustancial en el mantenimiento de carreteras y terraplenes de ferrocarril, sino que también aumenta la velocidad de la construcción de carreteras costeras y vías de ferrocarril así como su capacidad para resistir una mayor carga por tráfico. Además, como el método no requiere productos químicos, el suelo y la química de las aguas subterráneas no van a cambiar, a diferencia de los métodos de mejoramiento donde se utiliza cemento o cal. Este método también reduce el impacto sobre el medio ambiente, reduciendo al mínimo las emisiones de gases de efecto invernadero y la necesidad de la explotación de canteras de arena natural y la grava (Indraratna *et al*, 2010).

3 METODOLOGÍA

De acuerdo al diccionario de la real academia de la lengua española se entiende por caracterizar:

Determinar los atributos peculiares de alguien o de algo, de modo que claramente se distinga de los demás.

De lo anterior, podríamos decir que para caracterizar un material, en este caso el *tepetate*, tendríamos que determinar sus atributos peculiares, que para el interés del área de construcción, sería la determinación de sus propiedades índice y mecánicas. La Tabla 3.1 sugerida por Rico (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.

- 1.- Terracerías
 - a) Clasificación:
 - Límites de plasticidad.
 - Granulometría
 - b) Calidad:
 - Peso volumétrico máximo.
 - A veces, Valor Relativo de Soporte
- 2.- Capa subrasante
 - a) Clasificación:
 - Límites de plasticidad.
 - Granulometría
 - b) Calidad:
 - Peso volumétrico máximo
 - Valor Relativo de Soporte
 - Expansión
 - Equivalente de Arena
 - c) Diseño:
 - Determinación de VRS o bien:
 - Pruebas de Hveem, o bien
 - Pruebas Triaxiales de Texas
- 3.-Base y sub-base
 - a) Clasificación:
 - Límites de plasticidad.
 - Granulometría

- b) Calidad:
 - Peso volumétrico máximo
 - Valor Relativo de Soporte
 - Expansión
 - Equivalente de Arena
 - c) Diseño:
 - Realizar pruebas indicadas para subrasante.
- 4.-Carpeta asfáltica
- a) Clasificación:
 - Límites de plasticidad.
 - Granulometría
 - b) Calidad:
 - Pruebas de desgaste y/o alterabilidad
 - Afinidad con el Asfalto
 - Expansión
 - Equivalente de Arena
 - Pruebas para definir las formas de los agregados.
 - c) Diseño:
 - Pruebas de Marshall o bien
 - Pruebas de Hveem
 - Método de C.K.E.
-

Tomando en cuenta la definición anterior y la tabla propuesta por Rico (1982), la caracterización del *tepetate* se determinó en base a las siguientes pruebas de laboratorio:

- Peso volumétrico Seco Suelto.
- Granulometría.
- Límite líquido.
- Límite plástico.
- Índice plástico.
- Clasificación mediante Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).
- Compactación mediante Próctor Estándar.

- Resistencia mediante compresión simple.

3.1 Descripción general.

Ya que el objetivo central del proyecto era efectuar la caracterización del *tepetate*, la primera actividad fue ubicar bancos de extracción de este material, siempre tratando de que fueran bancos en activo, de los cuales actualmente se esté utilizando el material, para así tener una idea de la calidad con la que cuentan los materiales utilizados en este tiempo en el municipio y áreas aledañas (Junio-Septiembre, 2010).

Para la realización del trabajo fue necesaria la extracción de muestras representativas de los bancos mostrados anteriormente. De cada banco se extrajo la cantidad aproximada de 100 kg y se depositó en costales, los cuales fueron traídos al laboratorio de Mecánica de Suelos y Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería, lugar donde se realizaron todas las pruebas. Para la realización de cada prueba se efectuaron los procedimientos descritos en el siguiente subcapítulo (en la sección de “Procedimientos previos”). Las pruebas se realizaron en el mismo orden que se describe a continuación, 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.

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* (mencionada solamente como ASTM en adelante):

- Peso volumétrico Seco Suelto (Volumen que considera el peso ocupado por el material y los vacíos entre sus partículas).
- Granulometría (Tamaño de agregados que lo constituyen).

- Límite líquido, límite plástico e índice plástico (Determinación de la plasticidad del material y por ende, de la existencia de expansión).
- Clasificación mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) que denomina el tipo de suelo.
- Compactación Proctor Estándar (Determinación de la mejor densidad del material).
- Resistencia a la compresión simple (Valor de resistencia del material).
- Coeficiente de permeabilidad (Define la velocidad del agua a través del material).

3.2 Descripción de pruebas de laboratorio.

3.2.1 Procedimientos previos.

- 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 $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

- 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 (Figura 3.1).



Figura 3.1 Formación del cono.

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 (Figura 3.2).



Figura 3.2 Cono truncado.

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 (figura 3.3).



Figura 3.3 División de la muestra en cuadrantes.

El cuarteador de muestras se utiliza generalmente para muestras menores de 100 kg, si sobrepasa esta magnitud, la muestra se debe reducir primero mediante cuarteo manual. Igual que en el procedimiento anterior se debe homogeneizar la muestra, después se extiende uniformemente sobre una charola y se vierte sobre el cuarteador, tratando que pasen cantidades similares a través de cada uno de los ductos, se obtienen 2 porciones de las charolas laterales, si la muestra es demasiado grande, se descarta una porción y la otra se vuelve a pasar hasta obtener la cantidad de material deseada (SCT, 2003).

– 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 Peso Volumétrico Seco Suelto.

Del material muestreado se hace un cuarteo ya sea de forma manual o haciendo ayuda del cuarteador mecánico, se va a vaciar el material en una cubeta volumétrica (si no se cuenta con una se utiliza un recipiente con volumen conocido o determinable) cuidando que la altura de caída no sea mayor a 5 cm, esta altura se puede controlar haciéndose ayuda de la palma de la mano, una vez llena la cubeta y enrasada se procede a tomar el peso de la misma, se repite el procedimiento tres veces y se realiza un promedio del peso, el cual será el peso obtenido entre el contenido de humedad de la muestra. Se puede utilizar el Formato 1 ubicado en la parte de Anexos de este trabajo, para poder realizar el reporte de prueba y los cálculos necesarios.

3.2.3 Granulometría

- Exposición general.

En la clasificación de los suelos para usos de ingeniería es acostumbrado utilizar algún tipo de análisis granulométrico. Una parte importante de los criterios de aceptabilidad de suelos para carreteras, aeropistas, presas de tierra, diques, y otro tipo de terraplenes es el análisis granulométrico. La información obtenida del análisis granulométrico puede en ocasiones utilizarse para predecir movimientos del agua a través del suelo así como la acción de las heladas. Los suelos muy finos son fácilmente arrastrados en suspensión por el agua que circula a través del suelo y los sistemas de subdrenaje usualmente se colman con sedimentos rápidamente a menos que sean protegidos adecuadamente por filtros de material granular debidamente graduado, establecidos a partir de un análisis granulométrico. El análisis granulométrico es un intento de determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano presentes en una masa de suelos dada. La muestra debe ser *estadísticamente representativa* de la masa de suelo. Como

no es físicamente posible determinar el tamaño real de cada partícula independiente de suelo la práctica solamente agrupa los materiales por rangos de tamaño. La información obtenida del análisis granulométrico se presenta en forma de curva. Para poder comparar suelos y visualizar más fácilmente la distribución de los tamaños de granos, es necesario recurrir a una representación logarítmica para los tamaños de partículas. Los procedimientos patrones utilizan el “porcentaje que pasa” como la ordenada en la escala natural de la curva de distribución.

Es evidente que una curva de distribución granulométrica sólo puede aproximar la situación real. Esto se debe a varias razones, incluyendo las limitaciones físicas para obtener muestras estadísticamente representativas, la presencia de grumos en el suelo, la limitación práctica impuesta por la utilización de mallas de forma regular para medir partículas de suelo de forma irregular y el número limitado de tamices utilizables en el análisis. El tamaño de la abertura de las mallas se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3.- Juego de mallas para la prueba.

Fracción	Malla	
	Designación	Abertura nominal (mm)
Grava	3"	75.00
	2"	50.00
	1 ½"	37.50
	1"	25.00
	¾"	19.00
	½"	12.50
	⅜"	9.50
	¼"	6.30
	Nº4	4.75
Arena con finos	Nº10	2.0
	Nº20	0.85
	Nº40	0.425
	Nº60	0.25
	Nº100	0.15
	Nº200	0.075

– Procedimiento de prueba

La forma de realización de la prueba es seleccionando una cantidad de material mediante previo cuarteo. Esta prueba se realiza mediante dos partes: una para la fracción gruesa y otra para la fracción de arena con finos. Las mallas comúnmente utilizadas para la fracción gruesa son de 3", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8" y la Malla N°4 que divide gravas de arenas. Se pasa el material por las mallas acomodadas en forma descendente de acuerdo al tamaño de abertura, cuidando de no perder material (Figura 3.4).



Figura 3.4 Cribado del material a través de las mallas.

Del material que pasó la malla N°4 se toman aproximadamente 200 g para realizar la granulometría a la fracción de arenas; es necesario tomar otros 100 g para obtener un testigo de humedad y hacer una corrección por humedad en la muestra. Este material se debe saturar de agua durante 12 horas o mediante ebullición por 15 minutos. Posteriormente a esta muestra representativa se le realizará un lavado en la malla N°200 (que es la que divide

a las arenas de los finos) para que las partículas finas pasen con mayor facilidad a través de la misma con ayuda del agua. Para la granulometría de arenas se utilizan normalmente las mallas N°10, N°20, N°40, N°60, N°100 y N°200. Se pueden utilizar los Formatos 2.a y 2.b ubicados en la parte de Anexos de este trabajo, para poder realizar el reporte de prueba y los cálculos necesarios.

3.2.4 Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad y clasificación por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

- Exposición general.

Estas pruebas permiten conocer las características de plasticidad de la porción de los materiales para la identificación y clasificación de los suelos. Las pruebas consisten en determinar, el límite líquido, es decir el contenido de agua para el cual un suelo plástico adquiere una resistencia al corte de 25g/cm^2 , éste valor se considera como la frontera entre los estados semilíquido y plástico. El límite plástico es el contenido de agua para el cual un rollito se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3 mm, éste se considera como la frontera entre los estados plástico y semisólido. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico.

- Procedimiento de prueba para el límite líquido.

Para la determinación del límite líquido es necesaria la técnica de la Copa de Casagrande, un instrumento desarrollado por el Dr. Casagrande a encargo del Dr. Karl Terzaghi. La copa de Casagrande es un recipiente de bronce o latón que debe cumplir con ciertas características (Figura 3.5).

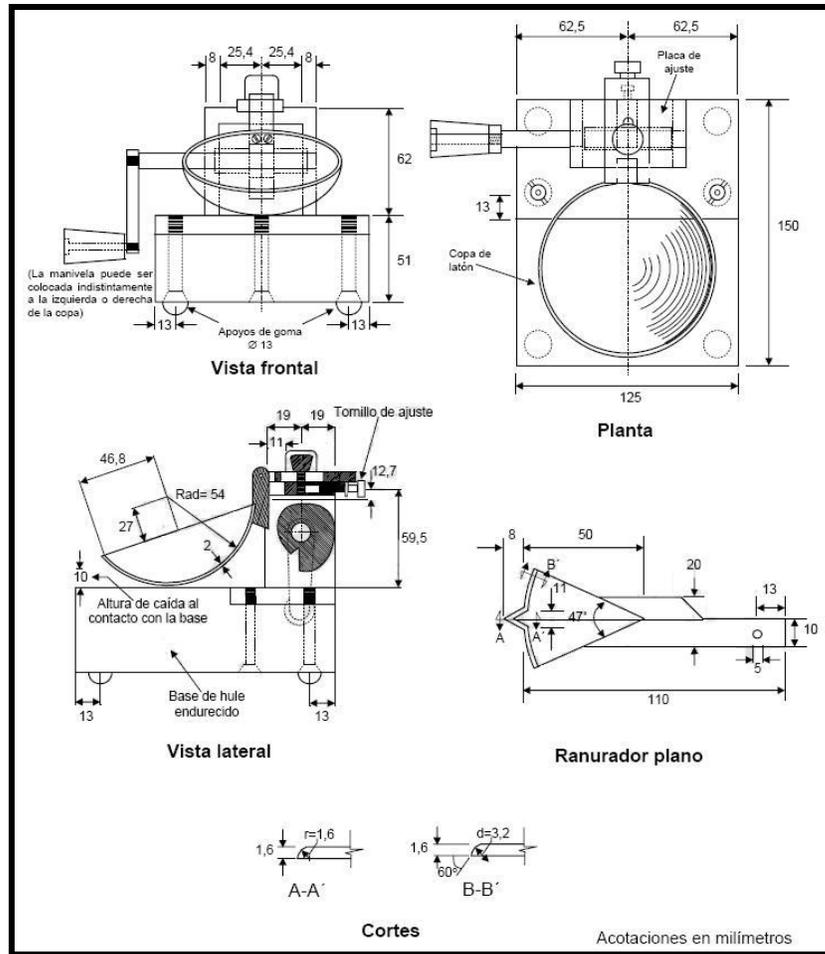


Figura 3.5 Diagrama con las características que deben cumplir tanto la Copa de Casagrande como el ranurador plano para la determinación del límite líquido.

Para la realización de la prueba es necesario contar con 300 g aproximadamente de material cribado por la malla N° 40. El material se deposita en un lugar apropiado y se le agrega el agua necesaria para saturar, se deberá dejar reposar durante 24 hrs en un lugar fresco, cubriendo el recipiente con un paño que se mantendrá húmedo a fin de reducir al mínimo la pérdida de agua por evaporación.

Pasado este tiempo se tomarán aproximadamente 150 g y se colocarán en una cápsula de porcelana donde se homogeneizará utilizando una espátula. En la copa de Casagrande (previamente calibrada de acuerdo a la Figura 3.5), se coloca una cantidad suficiente de material para que, una vez extendido con

la espátula, se alcance un espesor de 8 a 10 mm en la parte central de la copa. Si se coloca mucho material este se elimina enrasando con la espátula. Para extender el material en la copa se procede del centro hacia los lados sin aplicar una presión excesiva con el mínimo de pasadas de la espátula. Una vez colocado el material en la copa se procede a realizar una ranura en la parte central del material contenido con un ranurador que cumpla las especificaciones de la Figura 3.5. Se debe dar una pasada firme con el ranurador en el centro del material, éste se mantendrá siempre normal a la superficie interior de la copa (Figura 3.6).



Figura 3.6 Forma como queda colocado el material en la copa de Casagrande.

Colocado y ranurado el material, se acciona la manivela del aparato para hacer caer la copa a razón de dos golpes por segundo, registrando el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 mm. Logrado lo anterior se toman con la espátula aproximadamente 10 g de material de la porción cerrada de la ranura y se determina su contenido de agua. Se repite este procedimiento, agregando incrementos de agua de aproximadamente 2 ml y homogeneizando con la espátula. Se realizan 4 determinaciones, éstas deben quedar en el rango de 10 y 35 golpes. Los golpes se grafican, representando en el eje de las abscisas en escala logarítmica, el número de golpes y en el de las ordenadas en escala aritmética. Se traza una línea recta que una aproximadamente a los puntos graficados; a esta recta se le llama curva de fluidez.

- Procedimiento de prueba para el límite plástico.

Del material preparado para la determinación del límite líquido, se toma una porción de tamaño tal que se pueda formar una pequeña esfera de aproximadamente 12 mm de diámetro, la que se moldea con los dedos para que pierda humedad y se manipula sobre la palma de la mano para formar un cilindro. El cilindro se hace girar con los dedos de las manos sobre una placa de vidrio para reducir su diámetro hasta que sea aproximadamente de 3 mm en toda su longitud (Figura 3.7). La velocidad de girado será de 60 a 80 ciclos por minuto. Si al alcanzar un diámetro de 3 mm el cilindro no se rompe en tres secciones simultáneamente, significa que el contenido de agua no ha llegado al del límite plástico. En tal caso se junta nuevamente todo el material para formar la pequeña esfera y se repite el procedimiento hasta que el cilindro se rompa en tres segmentos al alcanzar el diámetro antes mencionado, una vez sucedido esto se colocan los fragmentos en un vidrio de reloj y se determina el contenido de humedad, el cual será el límite plástico. Se puede utilizar el Formato 3 en la parte de Anexos, para poder hacer el reporte de prueba y los cálculos necesarios.



Figura 3.7 Determinación del límite plástico

- Determinación del índice de plasticidad.

Ya calculados el límite líquido y el límite plástico se determina el índice plástico como la diferencia del límite líquido y el límite plástico. Si el material es muy arenoso y no pueda determinarse el límite plástico, como es el caso de los *tepetates*, se reportan el límite plástico y el índice plástico como NP (No plástico). Se puede utilizar el Formato 3 en la parte de Anexos, para poder hacer el reporte de prueba y los cálculos necesarios.

- Clasificación mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Este sistema está basado en el Sistema de clasificación de Aeropuertos propuesto por el doctor Casagrande. Los suelos son materiales con partículas de tamaño menor de 7.5 cm (3"). Los suelos se clasifican como suelos gruesos cuando más del 50% de sus partículas son de tamaño mayor que 0.075 mm (Malla N°200) y como suelos finos cuando el 50% de sus partículas o más son de tamaño menor.

Los suelos gruesos se clasifican como grava (identificada con el símbolo G) cuando más del 50% de las partículas de la fracción gruesa tienen tamaño mayor que 4.75 mm (malla N°4) y como arena (identificada con el símbolo S) cuando el 50% de las partículas o más de la fracción gruesa, son de tamaño menor. En cambio, los suelos finos se clasifican según sus características de plasticidad en Limo (identificado con el símbolo M) y arcilla (identificada con el símbolo C).

3.2.5 Prueba Proctor Estándar.

- Exposición general

La compactación de suelos es el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos. Su importancia estriba en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtiene al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten su peso específico seco, disminuyendo sus vacíos. Por lo general, las técnicas de

compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc. Algunas veces se hace necesario compactar al terreno natural, como en el caso de cimentaciones sobre arenas sueltas.

Los materiales puramente friccionantes, como la arena, se compactan eficientemente por métodos vibratorios, en tanto que en los suelos plásticos, el procedimiento de carga estática resulta el más ventajoso. En la práctica, estas características se reflejan en los equipos disponibles para el trabajo, tales como plataformas vibratorias, rodillos lisos, neumáticos o “pata de cabra”.

Existen muchos métodos para reproducir, al menos teóricamente en el laboratorio unas condiciones dadas de compactación de campo. Todos ellos pensados para estudiar, además, los distintos factores que gobiernan la compactación de los suelos. Históricamente, el primer método, en el sentido de la técnica actual, es el debido a R. R. Proctor y es conocido hoy día como Prueba Proctor Estándar o A.A.S.H.O. (*American Association of State Highway Officials*) Estándar. La prueba consiste en compactar el suelo en cuestión de tres capas, dentro de un molde de dimensiones y forma especificadas, por medio de golpes de un pisón, también especificado, que se deja caer libremente desde una altura prefijada.

Los datos que determinan la energía específica en la prueba, fueron establecidos originalmente por Proctor como adecuados para reproducir los pesos específicos secos que podían lograrse económicamente (es decir, con un número moderado de pasadas) con el equipo comercialmente disponible en aquella época.

Con este procedimiento en el proceso el contenido inicial de agua del suelo, encontrado que tal valor era de fundamental importancia en la compactación lograda. En efecto, observó que a contenidos de humedad crecientes, a partir de valores bajos, se obtenían más altos pesos específicos y, por lo tanto, mejores compactaciones del suelo, pero que esta tendencia no se

mantenía indefinidamente, sino que al pasar la humedad de un cierto valor, los pesos específicos secos obtenidos disminuían, resultando peores compactaciones en la muestra. Es decir, Proctor propuso de manifiesto que, para un suelo dado y usando el procedimiento descrito, existe una humedad inicial, llamada la “óptima”, que produce el máximo peso específico seco que puede lograrse con este procedimiento de compactación.

La prueba permite determinar la curva de compactación de los materiales, incluidos los utilizados para terracerías como es el caso del *tepetate*. A partir de ésta curva se puede inferir la masa volumétrica seca máxima así como el contenido de humedad óptimo.

- Procedimiento de la prueba Proctor estándar.

Existen cuatro variantes para pruebas de compactación (Variantes A, B, C y D), la prueba Proctor estándar corresponde a la variante o método A. En la Tabla 5 se pueden observar las características que siguen tanto la prueba como el equipo.

Tabla 3.4 Características de las variantes de las pruebas de compactación.

Tipo de prueba	Estándar		Modificada	
Masa del pisón, kg	2,5 ± 0,01		4,54 ± 0,01	
Diámetro del pisón, mm	50,8		50,8	
Altura de caída del pisón, cm	30,5 ± 0,1		45,7 ± 0,1	
Número de capas	3		5	
Variantes	A y C	B y D	A y C	B y D
Tamaño máximo del material, mm	4,75 (N°4)	19,0 (¾")	4,75 (N°4)	19,0 (¾")
Diámetro int. del molde, mm	101,6 ± 0,4	152,4 ± 0,7	101,6 ± 0,4	152,4 ± 0,7
Número de golpes por capa	25	56	25	56
Tamaño de la muestra de prueba, kg	4,0	7,5	4,0	7,5

Para la realización de la prueba es necesario dividir el material en 5 muestras representativas de aproximadamente 2 kg. Este material debió haber pasado previamente la malla N°4. A una de las porciones preparadas se le agrega la cantidad de agua necesaria para que tenga un contenido de agua inferior del 4% al 6% respecto al óptimo estimado. A las siguientes se les agrega agua aproximadamente en uno o dos puntos porcentuales. Se divide

cada muestra aproximadamente en tres porciones iguales, se colocan una por una las fracciones de material en el molde y se les aplica 25 golpes distribuidos uniformemente en la superficie de la capa con el pisón de 2.5 kg (Figura 3.8).



Figura 3.8 Elaboración del espécimen de prueba.

Concluidas las tres capas se retira la extensión del molde y se verifica que el material no sobresalga del molde Proctor en un espesor promedio de 1.5 cm como máximo. Si esto sucede se repite la prueba agregándose menos material en cada capa, si no, se procede a enrazar el molde y se toman los datos pertinentes. Se puede utilizar el Formato 4 ubicado en la parte de Anexos de este trabajo, para poder realizar el reporte de prueba y los cálculos necesarios.

3.2.6 Prueba para determinar la resistencia a compresión simple

- Exposición general.

La prueba de compresión simple es la más usada en los laboratorios de mecánica de suelos para los trabajos de rutina. Esta prueba tiene la ventaja de ser de fácil realización y de exigir equipo relativamente sencillo, en comparación con las pruebas triaxiales (Figura 3.9). Sin embargo, una correcta interpretación de sus resultados es más difícil que en el caso de las pruebas triaxiales, si se desea ir al fondo de los mecanismos de falla que tiene lugar; por el contrario, los resultados de la prueba son de fácil aplicación a los trabajos de rutina, por lo menos en apariencia, pero es recomendable que las conclusiones que se deriven de esta prueba vayan siempre sancionadas por un especialista.



Figura 3.9 Equipo para la realización de pruebas de compresión simple y compresión triaxial.

Para especímenes de suelo remoldeado, la muestra se debe homogeneizar sin grumos, se prepara un fragmento de tubo de bronce o latón

y una placa de vidrio, aceitándolos levemente, se introduce el material en el tubo de bronce sobrepuesto sobre la base de vidrio y se apisona el material.

- Procedimiento de prueba.

Se preparan los *tepetates* con su humedad óptima y a su peso específico seco máximo, y se compactan mediante la prueba Proctor estándar, después de esto se extrae la muestra remoldeada del molde Proctor con sumo cuidado. De esta muestra se van a labrar probetas con mucho cuidado, ya que esta operación es muy difícil en los suelos arenosos ya que tienen partículas más gruesas y su retención de humedad es menor. En la práctica esta prueba está diseñada para suelos cohesivos, pero se hizo uso de ella para obtener un valor aproximado. Se realizan un mínimo de tres probetas de 3.6 cm de diámetro de base y 9 cm de altura, de estas 3 probetas se obtiene un valor promedio. Y se someten a carga en el anillo de carga (Figura 3.10).

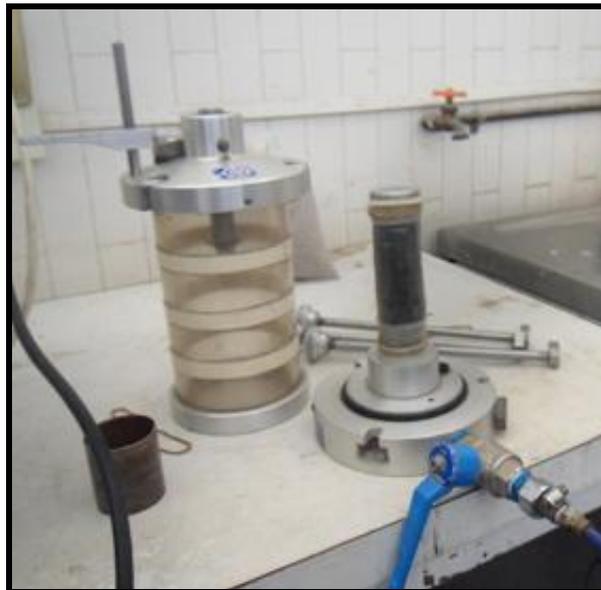


Figura 3.10 Espécimen preparado para someterlo a carga en la prueba de compresión simple.

Se anota el valor máximo de carga y se calcula el esfuerzo máximo resistente, también se pueden realizar gráficas de esfuerzo-deformación para reportar.

3.2.7 Determinación de coeficiente de permeabilidad mediante permeámetro de carga variable.

- Exposición general.

El coeficiente de permeabilidad es una constante de proporcionalidad relacionada con la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso. Este valor refleja propiedades físicas del suelo y en cierta medida indica la mayor o menor facilidad con que el agua fluye a través del suelo, estando sujeta a un gradiente hidráulico dado. Existen dos métodos generales de laboratorio para determinar directamente el coeficiente de permeabilidad de un suelo. Estos son los llamados método de carga constante y el método de carga variable. Ambos métodos se basan en el uso de la ley de Darcy (Ecuación 1 y Ecuación 2).

$$v = k i \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Y la velocidad correspondiente del flujo es:

$$q = k i A \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

q = Cantidad de flujo por unidad de tiempo.

k = Coeficiente de permeabilidad (unidades de velocidad).

i = Gradiente hidráulico= h/L .

h = Diferencia de cabezas hidráulicas a lo largo de la muestra.

L = Longitud de la muestra a través de la cual se mide h .

A = Área de la sección transversal de la masa de suelos en consideración.

En el permeámetro de carga variable (Figura 3.11) la carga que actúa sobre el espécimen de prueba varía con el tiempo de prueba. Es necesario

alimentar una sola vez con agua y no hay necesidad de mantener siempre el mismo nivel de entrada de agua.

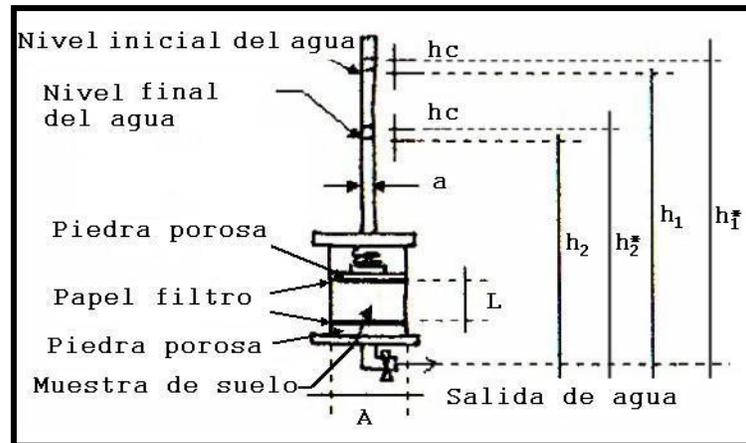


Figura 3.11 Permeámetro de carga variable.

Como se observa en la figura 3.11, la muestra de suelo de área transversal A y longitud L , confinada en un cilindro, se somete a una carga hidráulica inicial h_1 y se deja transcurrir cierto tiempo hasta llegar a una carga hidráulica final h_2 . El agua fluye a través de la muestra, midiéndose el tiempo necesario para que el agua que hay en la bureta alimentadora pase de un nivel uno a un nivel dos.

- Procedimiento de prueba.

El procedimiento de prueba está basado en la teoría y el método del permeámetro de carga variable, pero sufre una ligera variable. Para esta prueba se basó en los pesos específicos secos máximos y en las humedades óptimas de los *tepetates* muestreados para crear los especímenes de prueba (Figura 3.12).



Figura 3.12 Preparación de especímenes de prueba para permeámetro de carga variable.

Como el equipo existente es frágil y pequeño, se tuvo que adaptar un equipo para poder realizar la prueba y que cumpliera con la teoría en la que está fundamentada ésta prueba. En el molde Proctor estándar se compactó el material muestreado, en las partes inferior y superior se le agregó filtros para asegurar que no hubiera pérdidas de material por arrastre, a este molde se le agregó un tubo de PVC a manera de que respetara el ancho de la muestra, sobre este se vació la carga hidráulica, y se tomaron las lecturas pertinentes para cada uno de los materiales muestreados (Figura 3.13).



Figura 3.13 Permeámetro de carga variable adaptado al molde Proctor estándar.

Se puede utilizar el Formato 5 ubicado en la parte de Anexos de este trabajo, para poder realizar el reporte de prueba y los cálculos necesarios.

4 RESULTADOS

4.1 Localización de los bancos *de tepetate*.

Para localizar los bancos de *tepetate* se revisaron las cartas del INEGI, tanto las topográficas como las de tipo de suelo. Las cartas topográficas incluyen algunos bancos de material. También se realizaron visitas a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) así como a la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SEDESU), que son las dependencias que de alguna manera controlan, aprueban y verifican la explotación de bancos de materiales. La extracción de material para las pruebas se llevó a cabo durante los meses de mayo y septiembre del 2010, en bancos que estuvieran en activo. En la Tabla 4.1 se muestran las coordenadas geográficas de los 10 bancos de donde se extrajo *tepetate*. Los sitios denominados T1, T2 y T3 corresponden a la zona de Tlacote. Los sitios denominados como C1, C2 y C3 están ubicados en la zona denominada como Conín. Los sitios denominados J1 y J2 son bancos que se encuentran en la zona de Jurica.

Tabla 4.1 Ubicación de los sitios de toma de muestras.

Designación del banco	Coordenadas Geográficas
Sitio T1	20°39'41"N - 100°29'34" O
Sitio T2	20°39'15"N - 100°29'15" O
Sitio T3	20°39'07"N - 100°28'53" O
Sitio J1	20°40'09"N - 100°27'50" O
Sitio J2	20°38'59"N - 100°25'33" O
Sitio C1	20°34'33"N - 100°17'10" O
Sitio C2	20°34'43"N - 100°18'48" O
Sitio C3	20°34'26"N - 100°18'48" O
Sitio Jaral	20°26'18"N - 100°26'05" O
Sitio Batán	20°29'34"N - 100°25'05" O

4.2 Determinación de Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS).

Dado que el *tepetate* suele ser tomado como una arena se realizó la determinación del Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS), para obtener un valor medio que pueda ser comparado al mismo peso pero en arenas. La determinación se hizo en cada uno de los bancos previo cuarteo del material mismo. Presentándose los resultados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS).

Banco	kg/m ³	t/m ³
Sitio T1	1165.2	1.165
Sitio T2	1077.36	1.077
Sitio T3	1357	1.357
Sitio J1	1141.56	1.142
Sitio J2	1192	1.192
Sitio C1	1065	1.065
Sitio C2	1220	1.220
Sitio C3	1392	1.392
Sitio Jaral	1173	1.173
Sitio Batán	1201	1.201

De estos resultados podemos observar que el 80% de los bancos tiene un valor promedio de 1.15 t/m³ que se acerca a valores como 1.1 y 1.2 antes reportados (Creixell, 1992; Bárbara *et al*, 1979).

4.3 Determinación de la granulometría del material.

La granulometría se realizó mediante el método mecánico para los 10 bancos de material. Se determinó utilizando el cribado por mallas, el cual determina cuantitativamente la distribución de partículas del suelo más grandes a 75 micras (retenido en el tamiz N° 200) (ASTM, 2007). La Figura 4.1 muestra las curvas granulométricas de los 10 bancos de *tepetate* y la Tabla 4.3 los porcentajes de gravas, arenas y finos de cada uno. De la figura 4.1 se observa

que 8 de 10 bancos tienen una distribución granulométrica semejante y que se muestra uniforme en un rango de valores.

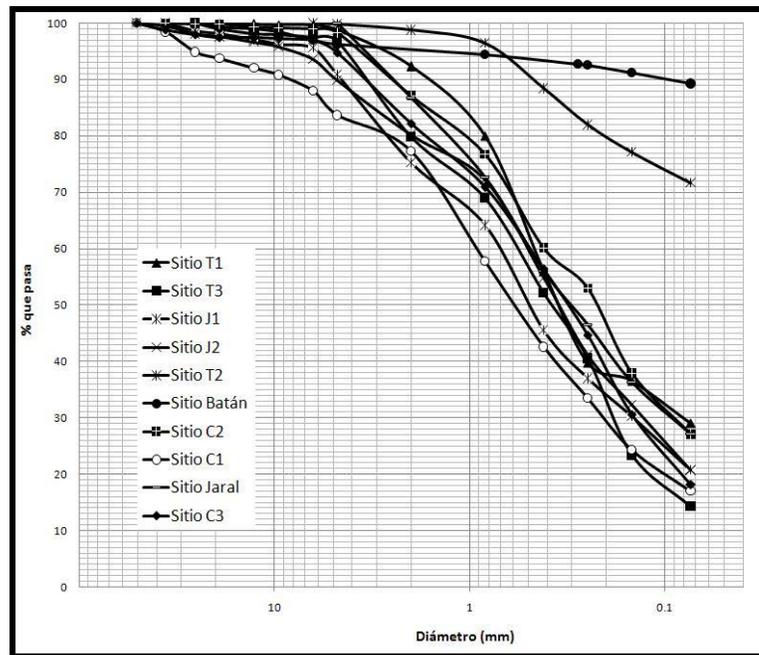


Figura 4.1 Curvas granulométricas de los diez bancos de *tepetate*.

De la observación de dichas curvas y de los valores indicados a continuación en la Tabla 4.3, se nota que el 70% de los bancos analizados presentan en promedio un 70% de arenas, con un 20% de finos y con un 10% o menos de gravas. Los bancos denominados Sitio T2 y Sitio Batán son los que presentan una mayor cantidad de la fracción fina con un 71.66% y un 88.55% respectivamente, son también estos mismos bancos los que presentan una menor cantidad de arenas con 28% y 7.4% respectivamente.

Tabla 4.3 Granulometría de cada sitio de estudio.

	Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)
Sitio T1	1.280	69.650	29.060
Sitio T2	0.230	28.110	71.660
Sitio T3	3.280	82.400	14.320
Sitio J1	9.130	70.100	20.720
Sitio J2	10.200	69.130	20.670
Sitio C1	16.352	66.613	17.035
Sitio C2	1.793	71.099	27.107
Sitio C3	5.254	76.515	18.232
Sitio Jaral	0.000	72.826	27.174
Sitio Batán	4.028	7.418	88.555

Para que el *tepetate* sea empleado en la construcción de subbases para pavimentos asfálticos su curva granulométrica tiene que tener una forma semejante a la vista en la Figura 2.1 y la relación entre el porcentaje en masa que pase la malla con abertura de cero coma cero setenta y cinco (0,075) milímetros (Nº200) al que pase la malla con abertura de cero coma cuatrocientos veinticinco (0,425) milímetros (Nº40) no debe ser mayor de cero coma sesenta y cinco (0,65). La tabla 4.4 presenta esta relación.

Tabla 4.4 Requisito de relación entre el porcentaje en masa que pasa la malla Nº200 y la malla Nº40.

	Nº200	Nº40	Relación	Requisito
Site T1	29.06%	55.96%	0.52	Cumple
Site T2	71.66%	88.38%	0.81	No Cumple
Site T3	14.32%	52.19%	0.27	Cumple
Site J1	20.77%	45.58%	0.46	Cumple
Site J2	20.67%	54.79%	0.38	Cumple
Site C1	17.03%	42.56%	0.40	Cumple
Site C2	27.11%	60.17%	0.45	Cumple
Site C3	18.23%	56.32%	0.32	Cumple
Site Jaral	27.17%	56.06%	0.48	Cumple
Site Batán	89.23%	93.00%	0.96	No Cumple

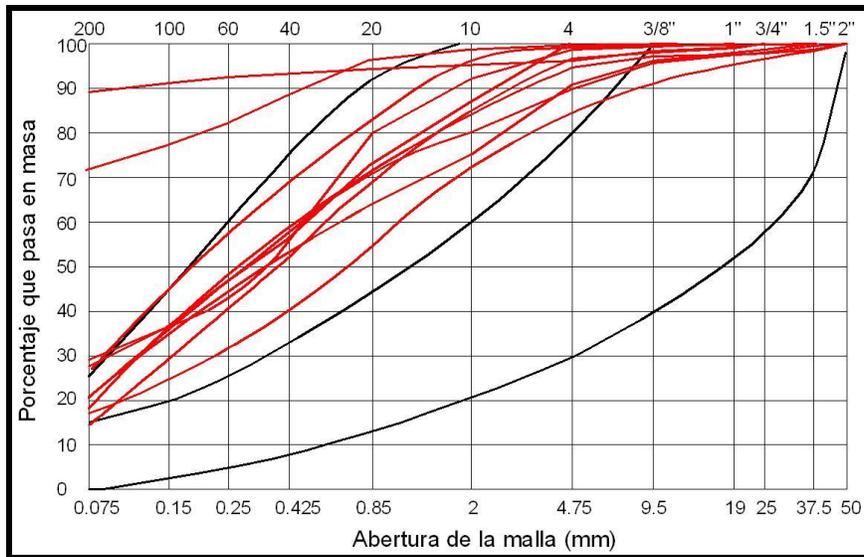


Figura 4.2 Zonas granulométricas recomendables para uso de los materiales como subbase de los 10 bancos de tepetate.

De la Figura 4.2, de la Tabla 4.4 y de las gráficas de zonas granulométricas en la sección de Anexos, podemos observar que ocho de los bancos de *tepetate* (Exceptuando el Sitio T2 y el Sitio Batán) cumplen el requisito para ser aceptados como materiales de subbase quedando en el rango de materiales cuya vida útil será menor a 10^6 la suma del número de ejes equivalentes acumulados de 8.2t, esperados durante la vida del pavimento.

4.4 Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad y clasificación por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

La determinación de las propiedades de Plasticidad (Límite Líquido, Límite Plástico e Índice Plástico mediante las normas ASTM 2010) fueron evaluadas para los diez bancos de material; sin embargo, por ser materiales con contenidos de arenas altos, en la mayoría de los casos fue imposible determinar su valor, lo que indica que no presentan Plasticidad (NP) (ASTM, 2010), con excepción de los bancos denominados “Sitio T2 y Sitio Batán”, que son los que presentan Plasticidad por la gran cantidad de finos que contienen. Las pruebas

fueron realizadas siguiendo las indicaciones de la norma ASTM D422-63.1. La Tabla 4.5 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 4.5 Valores Promedio de Límite líquido (LL), límite plástico (LP) e Índice de plasticidad (IP) por cada banco estudiado.

	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Sitio T1	NP	NP	NP
Sitio T2	47.4	34.9	12.5
Sitio T3	NP	NP	NP
Sitio J1	NP	NP	NP
Sitio J2	NP	NP	NP
Sitio C1	NP	NP	NP
Sitio C2	NP	NP	NP
Sitio C3	NP	NP	NP
Sitio Batán	73.2	41.4	31.8
Sitio Jaral	NP	NP	NP

NP= No hay Plasticidad.

De los resultados de Plasticidad se tiene entonces que el 80% de los bancos no la presentan (NP). Se destaca que solo dos bancos contienen Plasticidad teniendo el “Sitio T2” un valor de 12.5% y el “Sitio Batán” un valor de 31.8% de Índice Plástico respectivamente. En la Tabla 4.6 podemos observar la clasificación de los *tepetates* de acuerdo al sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), que encuentra sus bases en el Sistema de Clasificación de Aeropuertos propuesto por el Dr. A. Casagrande (Juárez y Rico, 1976). Se observa que el 80% de los sitios son SM (arena limosa), siendo solo uno ML (Limo de baja compresibilidad) y otro un MH (limo de alta compresibilidad).

Tabla 4.6 Clasificación de suelos mediante SUCS.

	Clasificación
Sitio T1	SM
Sitio T2	ML
Sitio T3	SM
Sitio J1	SM
Sitio J2	SM
Sitio C1	SM
Sitio C2	SM
Sitio C3	SM
Sitio Batán	MH
Sitio Jaral	SM

De aquí se tiene que el 80% de los bancos presenta un SM (arena limosa) y solo uno presenta un ML (Limo de baja plasticidad).

4.5 Compactación mediante la prueba Proctor Estándar.

Dado que el *tepetate* es un material que se suele colocar compactado en el área de la Construcción se determinó la compactación ideal del material llevando a cabo la prueba Proctor Estándar a los materiales de todos los bancos. De los resultados mostrados en la Tabla 4.7 se pudo observar que existen ligeras diferencias en la humedad óptima y su peso específico seco máximo en cada uno de los distintos bancos de material. La prueba Proctor Estándar fue determinada mediante norma (Método A, Norma ASTM, 2010).

Tabla 4.7 Humedad Óptima (ω_{opt}) y Peso Específico Seco Máximo ($\gamma_{m\acute{a}x}$) obtenidos mediante Proctor Estándar.

	ω_{opt} (%)	$\gamma_{m\acute{a}x}$ (t/m ³)
Sitio T1	26.38	1.385
Sitio T2	32	1.4
Sitio T3	23	1.48
Sitio J1	24.5	1.545
Sitio J2	25.25	1.392
Sitio C1	25	1.284
Sitio C2	24.6	1.356
Sitio C3	20.5	1.548
Sitio Jaral	23	1.384
Sitio Batán	38	1.2

Se observa que las humedades óptimas de la mayoría de los bancos oscila entre 23-26% con un 1.42 t/m³ en promedio. Siendo los bancos T2 y Batán los que presentan humedades más altas con un 32% y un 38%, mientras que varían en peso específico con 1.4 t/m³ y 1.2 t/m³ respectivamente. Lo anterior se debe a la gran cantidad de finos que presenta.

4.6 Determinación de la Resistencia a Compresión Simple (q_u).

Para la determinación de la Resistencia a la Compresión Simple se preparó material de cada uno de los bancos con los datos obtenidos mediante la prueba Proctor Estándar (humedad óptima y peso específico seco máximo). El material preparado se compactó y se fabricaron un mínimo de 4 probetas de suelo remoldeado por banco. La Tabla 4.8 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 4.8 Valores promedio de Resistencia a Compresión Simple (q_u).

	q_u (kg/cm ²)
Sitio T1	1.06
Sitio T2	2.07
Sitio T3	1.4
Sitio J1	0.94
Sitio J2	1.00
Sitio C1	0.68
Sitio C2	0.49
Sitio C3	0.87
Sitio Jaral	0.92
Sitio Batán	7.64

El 80% de los bancos (los clasificados como SM) presentaron una resistencia promedio de 0.9 kg/cm² (de 0.5-1.4 kg/cm²), mientras que el 20% presenta resistencias mayores (bancos con gran cantidad de finos Batán y T2). La resistencia promedio presenta un valor muy bajo comparada con la del banco "Sitio Batán". En general la resistencia osciló entre 0.5 y 1.4 kg/cm² en la mayoría de los bancos, excepto para los bancos T2 y Batán. En el banco T2 la resistencia es de 2.0 kg/cm², y se debe a la cantidad de finos presentes en este banco. Para el banco Batán la resistencia de 7.64 kg/cm² se debe a su alta cantidad de finos y a la alta compresibilidad que presenta el material, permitiéndole una mayor deformación (comparada a los otros bancos) antes de presentar falla.

4.7 Determinación del Coeficiente de Permeabilidad

Para la determinación de la Permeabilidad en suelos gruesos existen dos métodos Directos, el método del permeámetro de carga constante y el método del permeámetro de carga variable, los cuales encuentran su fundamentación en la ley de Darcy (Bowles, 1978). Ambos métodos son aplicables solo para suelos cuya fracción fina no supera un porcentaje mayor al 10% (ASTM, 2006). Por lo tanto, la determinación de la Permeabilidad para el resto de los suelos procede solo mediante métodos Indirectos cuyos resultados son muy cuestionados. Por lo anterior y observando que nuestros materiales tenían altos contenidos de partículas gruesas (70% de arena y 10% de grava) se procedió a utilizar la metodología del permeámetro de carga variable.

El método consistió en compactar el suelo dentro del molde Proctor aplicándole las características indicadas por la prueba Proctor Estándar (humedad óptima y peso específico seco máximo). A dicho molde se le adhirió un tubo de PVC para conferirle la carga hidráulica y posteriormente medir los gradientes hidráulicos y temperaturas presentadas. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Coef. De Permeabilidad (k).

	k (m/s)
Sitio T1	4.91×10^{-7}
Sitio T2	NP
Sitio T3	3.91×10^{-7}
Sitio J1	5.24×10^{-9}
Sitio J2	1.33×10^{-7}
Sitio C1	8.32×10^{-6}
Sitio C2	9.22×10^{-7}
Sitio C3	1.36×10^{-6}
Sitio Jaral	4.15×10^{-8}
Sitio Batán	2.64×10^{-8}

NP-No se pudo determinar debido a largo tiempo en el permeámetro.

Ya se ha reportado que el valor de permeabilidad para una grava con arena (GW, GP, SW, SP y GM) es de 10^{-2} a 10^{-5} m/s, para una arena con limo (SM, SL y SC) de 10^{-5} a 10^{-9} m/s y para arcillas es de 10^{-9} a 10^{-11} m/s (Bowles, 1988), mientras que para *tepetates* se ha reportado el rango de valores de 1.5×10^{-7} hasta 36×10^{-7} m/s (Nimlos y Hillery, 1990).

Se observa entonces que el 90% de los bancos de *tepetate* entran en el rango mencionado del coeficiente de permeabilidad (de 10^{-6} - 10^{-9} m/s), correspondiendo a la permeabilidad de una arena con limo por lo que el *tepetate* puede ser considerado con un grado de permeabilidad entre bajo y muy bajo (Therzaghi, 1996). Cabe subrayar que para el Sitio T2 (NP) no pudo ser determinado el valor de permeabilidad mediante este método (lo que indica que debe ser mucho muy bajo), debido a los largos tiempos en el permeámetro (por la gran cantidad de finos presente) y la posibilidad de errores debido a la evaporación.

4.8 Resumen

En la Tabla 4.10 se presenta un resumen de los valores obtenidos en las pruebas realizadas a los distintos *tepetates*.

Tabla 4.10 Resumen de la caracterización geotécnica de los *tepetates*.

Banco	PVSS t/m ³	Granulometría			Límites de Plasticidad			SUCS Clasif.	Proctor Std.		C.S. q _u (kg/cm ²)	C.P. k (m/s)
		Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)		ω _{opt} (%)	γ _{dmáx} (t/m ³)		
Sitio T1	1.165	1.28	69.65	29.06	NP	NP	NP	SM	26.38	1.385	1.06	4.91×10^{-7}
Sitio T2	1.077	0.23	28.11	71.66	47.4	34.9	12.5	ML	32	1.4	2.07	NP
Sitio T3	1.357	3.28	82.4	14.32	NP	NP	NP	SM	23	1.48	1.4	3.91×10^{-7}
Sitio J1	1.142	9.13	70.1	20.72	NP	NP	NP	SM	24.5	1.545	0.94	5.24×10^{-9}
Sitio J2	1.192	10.2	69.13	20.67	NP	NP	NP	SM	25.25	1.392	1	1.33×10^{-7}
Sitio C1	1.065	16.352	66.613	17.035	NP	NP	NP	SM	25	1.284	0.68	8.32×10^{-6}
Sitio C2	1.22	1.793	71.099	27.107	NP	NP	NP	SM	24.6	1.356	0.49	9.22×10^{-7}
Sitio C3	1.392	5.254	76.515	18.232	NP	NP	NP	SM	20.5	1.548	0.87	1.36×10^{-6}
Sitio Jaral	1.173	0	72.826	27.174	73.2	41.4	31.8	MH	23	1.384	0.92	4.15×10^{-8}
Sitio Batán	1.201	4.028	7.418	88.555	NP	NP	NP	SM	38	1.2	7.64	2.64×10^{-8}

De donde:

PVSS=Peso volumétrico seco suelto.

LL=Límite Líquido.

LP=Límite Plástico.

IP=Índice Plástico.

SUCS=Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

ω_{opt} = Contenido de Humedad óptima.

$\gamma_{dmáx}$ =Peso específico seco máximo.

C.S.=Compresión simple.

q_u = Resistencia última a compresión simple.

C.P.= k =Coeficiente de permeabilidad.

De la correlación de los valores presentados en la tabla anterior es como podemos obtener la caracterización geotécnica del material denominado *tepetate*.

5 CONCLUSIONES

Respecto a la Caracterización Geotécnica de los *Tepetates* se tiene:

- En general el 70% de los bancos analizados presentan en promedio un 70% de arenas, con finos entre 20% y 30%, mientras que reportan un 10% o menos de gravas. Dos de los bancos (20%), presentan altos contenidos de finos, siendo estos en un 72% y en 88%, y aproximadamente con 28% y 7% de arenas respectivamente. Por su granulometría, el 80% de los bancos analizados pueden ser empleados en la construcción de subbases para pavimentos asfálticos cuyo.
- El 80% de los *tepetates* presentados son clasificados como SM (arena con limo) mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, exceptuando al material del Sitio T2 (10% de los bancos) que fue clasificado como ML (limo de baja compresibilidad) y al material del Sitio Batán (10%) que fue clasificado como MH (limo de alta compresibilidad).
- De la Compactación podemos concluir que la humedad óptima del 80% de los *tepetates* SM no varía mucho estando ésta entre un rango de 23% a 26%, lo mismo pasa con el peso específico seco máximo, que varía en un rango de 1.38 a 1.54 t/m³. Los *tepetates* clasificados como MH u ML tuvieron una humedad óptima mayor (32 y 38%) y un peso seco específico máximo de 1.2 t/m³-1.4 t/m³.
- De la Compresión Simple podemos concluir que 80% de los *tepetates* SM tienen un valor promedio de 0.9 kg/cm², con valores que oscilan en el rango de 0.5 a 1.4 kg/cm².
- De la Permeabilidad se concluye que el 90% de los *tepetates* oscilan en el rango de de 10⁻⁶-10⁻⁹ m/s, que efectivamente corresponde a la permeabilidad de una arena con limo aunque uno de ellos no se clasifique como arena con limo sino como limo (MH). Finalmente no se

pudo determinar la permeabilidad de un banco por este método porque tiene gran cantidad de finos, lo que dificulta su medición e indica que debe tener un valor mucho más bajo.

- Por lo tanto, la caracterización geotécnica de los *tepetates* queda como sigue: 80% de los bancos muestreados, el material denominado *tepetate* es un SM (Arena limosa) con un contenido aproximado de 70% de arenas, 20-30% de finos y 10% de gravas o menos con una distribución granulométrica semejante y uniforme en un rango de valores, con poca o nula plasticidad, con resistencia promedio de 0.9 kg/cm^2 y con una permeabilidad que oscila entre 10^{-6} - 10^{-9} m/s en promedio. Se debe mencionar entonces que los bancos están ofreciendo un material con características diferentes, lo que hace que tengan comportamientos variados.

Respecto a las propiedades que debe requerir el *tepetate* como material inerte se tiene:

La caracterización geotécnica del material muestra que aproximadamente el 80% de los bancos cumplen con las propiedades de baja o nula plasticidad que garantiza que no tendrán alteraciones de volumen por cambios de humedad. Los *tepetates* pueden ser considerados como inertes ya que no presenta potencial expansivo de acuerdo a los criterios de Holtz y Raman que mencionan materiales con valores de Índice Plástico menores a 15% (Holtz y Gibbs, 1956; Raman, 1955), así como las recomendaciones de la SCT que mencionan valores menores a 12% (Subrasante). Sin embargo, se debe investigar el impacto que tiene el rango de valores de Coeficiente de Permeabilidad existente en este tipo de materiales, ya que se colocan frecuentemente como materiales de sustitución de suelos expansivos, donde además de requerir un material inerte se necesita un material impermeable.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Arias, H. y B. Figueroa. 1990. "*La ecuación universal de pérdidas de suelos en la cuenca del río Texcoco*", XI Cong. Latinoamericano y II Cong. Cubano de la Ciencia del Suelo. Marzo 12-17. La Habana, Cuba.
- ASTM D2434 – 68. 2006. "*Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)*", Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D 422-63. 2007. "*Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*", Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D 4318-10. 2010. "*Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of soils*", Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D698 - 07e1. 2010. "*Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*", Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bárbara, Francisco *et al.* 1979. "*Materiales y procedimientos de construcción*". Vol. II. Edit. Herrero S.A., México.
- Bowles, Joseph E. 1978. "*Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*", 2ª Edición. Edit. Mc Graw Hill.
- Bowles, Joseph E. 1988. "*Foundation analysis and design*", 4ª Edition. Edit. Mc Graw Hill. Pp. 51.
- Braunack, M.V. y Dexter, A.R. 1989, "*Soil aggregation in the seedbed: a review. II Effect of aggregates sizes on plant growth*", Soil and Tillage

- Research, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands. Pp.281-298.
- Chen, Fu Hua. 1988. "*Foundations on expansive soils: Developments in geotechnical engineering*", Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands. Pp. 166-171.
- Creixell, José. 1992. "Estabilidad de las construcciones", 1ª Edición. Edit. Reverté Ediciones, S.A., México. Pp. 17
- De Noni, G., G. Trujillo y M. Viennot. 1986. "*L'erosion et la conservation des sols en Equateur*". Cahier ORSTOM, Sér. Pédol. 22 (2): 235-245.
- Dubroeuq, D., Quantin P. Y Zebrowski, C. "Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación", TERRA Latinoamérica, Núm 7. P. 3-12.
- Flores-Román, David *et al.* 1992. "*Suelos con fragipán de origen volcánico en clima semicálido y subhúmedo: El caso del noreste del Estado de Morelos, México*", Revista Instituto de Geología, Vol. 10, Núm. 2. Pp. 151-163.
- Gama-Castro, Jorge *et al.* 2007. "*Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista Morelos*", Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo 49, Num.1.
- Garnica-Anguas, Paul *et al.* 2002. "*Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres*", Publicación Técnica No. 201, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.
- Gibson, Charles. 1996. "*Los Aztecas bajo el dominio español, 1519-1810.*", Editorial Siglo XXI, 13ª edición, México, D.F.
- Gizenski, S. F. and Lee, L.J. 1965. "*Comparison of laboratory swell tests to small scale field tests*", International Research and engineering conference on expansive soils.

- Hernández-Xolocotzi, Efraím. 1987. "*Etnobotánica de Tlaxcala*", Uso y manejo de los *tepetates* para el desarrollo rural, Universidad Autónoma de Chapingo, México. Pp. 1-8.
- Holtz, W.G. 1969. "*Volume change in Expansive Clay Soils and Control by lime treatment*", Proceedings of 3rd Conference on SM&FE, Zurich, Vol. 1.
- Holtz, W.G. y Gibbs, H.J. 1956. "*Engineering properties of expansive clays*", Transactions, ASCE. Paper No. 2814. Vol. 121. Pp. 641-677.
- Indraratna, B. *et al.* 2010. "*Sustainable soil improvement via vacuum preloading*", Proceedings of the ICE - Ground Improvement, Vol. 163. Num. 1.
- INEGI. 2005. "*Guía para la Interpretación de Cartografía Aérea*", Publicación del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- Juárez-Badillo, Eulalio y Rico-Rodríguez, Alfonso. 1976. "*Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos.*", Tomo I, 3^a Edición. Edit. Limusa, México.
- Mielhich, G. 1984. "*Chronosequenzen und anthropogene Veränderungen andesitischer Vulkanaschböden in drei Klimastufen eines randtropischen Gebirges (Sierra Nevada de México)*". Universität Hamburg. Hamburg, Deutschland.
- Mielhich, G. 1991. "*Chronosequenzen of volcanic ash soils*", Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 15. Hamburg, Deutschland.
- Mitchell, James K. 1982. "*Soil improvement- Its Past, Present and Prospects for the Future*", Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos, México D.F. 1982.
- Navarro-Garza, Hermilio *et al.* 2004. "*Productividad del tepetate con sistemas rotacionales*", TERRA Latinoamericana, Vol. 22, Núm. 1.

- Nimlos, T.J. 1990. "*Morphology, genesis and classification of soils formed over Mexican Tepetate*", Soil Survey Horizons, Vol. 30, Núm. 3. Pp. 72-77.
- Nimlos, T. J. y Hillery, P.A. 1990 "*The Strength/Moisture Relations and Hydraulic Conductivity of Mexican Tepetate*", Soil Science, Vol. 150 (1). Pp. 425-430.
- Nimlos, T.J. y Ortíz, C.A. 1987. "*Tepetate the rock mat*", J. Soil Water Conservation. Pp. 83-86.
- Instituto de Ecología. 1998. "*Norma técnica ecológica NTE-IEG-002/98*", Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guanajuato. Guanajuato, México. Pp. 1-25.
- Raman, V. 1955. "*Identification of Expansive Soils from the Plasticity Index and the Shrinkage Index Data*" Indian Eng., Calcuta. Vol. XI (1). Pp. 17-22
- Rico-Rodríguez, Alfonso. 1982. "*La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres*" Vol. II. Edit. Limusa, México.
- Rodríguez-Tapia, S., et al. 1999. "*Intemperismo en tepetates y en cenizas volcánicas y su influencia en la formación de andisoles*", TERRA Latinoamérica, Vol. 17, Núm. 2. Pp. 97-108.
- Rodríguez-Tapia, S., et al. 2004. "*Los tepetates de la ladera oeste del cerro Tláloc: saprolita, sin endurecimiento pedológico.*" TERRA Latinoamérica, Vol. 22, Núm. 1. Pp. 11-21.ç
- Romero-Cervantes, J.C. y Pérez-Rea, M.L. 2008. "Análisis de la pérdida de resistencia por remoldeo de suelos arenosos de la zona estuarina de Nayarit", Revista Enlace Químico, Vol. 2, Núm. 2. Guanajuato, México.
- SCT. 2003. "*Secado, disgregado y cuarteo de Muestras*", Métodos de muestreo y prueba de materiales, Normativa SCT, México. Pp. 1-9.

- SCT. 2003. "Materiales para Subbases y Bases", Características de los materiales, Normativa SCT, México. Pp. 1-9.
- Simeón, Remi. 1885. "*Dictionnaire de la Langue Nahuatl ou Mexicaine*". Ed. Siglo XXI. México, D.F.
- Therzaghi, Karl *et al.* 1996. "*Soil mechanics in engineering practice*", Third edition, Wiley-Interscience Publication, New York.
- Trejo, M.A. 1986. "*Soluciones constructivas de cimentaciones en suelos expansivos*", Curso Cimentaciones sobre arcillas expansivas, Qro., México.
- Velásquez-Rodríguez, Alma S., *et al.* 2001. "*Formación de agregados en tepetate por influencia de especies vegetales*", Agrociencia, Vol. 35, Núm. 3. Pp. 311-320.
- Williams, B.J. y Ortiz-Solorio, Carlos. 1981. "*Middle american folk soil taxonomy*". Annals of the Association of American Geographers, Vol. 71, Núm. 3. Pp. 335-358.
- Williams, H. P. 1983. "*Compaction of soils*", Journal of the ICE, Vol. 33, Num. 2.
- Zebrowski, Claude. 1992. "*Los suelos endurecidos en América Latina*". Terra Latinoamérica, Num. 10. Pp. 15-22.
- Zepeda, Alfredo *et al.* 2004. "*Mecánica de Suelos no Saturados*" Edit. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.

A N E X O S



Formato 1

Determinación del Peso volumétrico suelto

Proyecto: _____
 Localización: _____
 Realizó: _____

Fecha: _____
 Sondaje no: _____
 Profundidad: _____

Volumen del recipiente: _____
 Peso del recipiente: _____

TESTIGO DE HUMEDAD PARA POSTERIOR CORRECCIÓN POR CONTENIDO DE AGUA	
Numero:	_____
Peso Flaco (WF):	_____
Wn + WF (g):	_____
WE + WF (g):	_____
ω:	_____

Determinación	1	2	3	4	5
Wrecipiente					
Wrecipiente + Wmaterial húmedo					
Wmaterial húmedo					
Peso volumétrico suelto					
Peso volumétrico corregido					
Promedio					



Formato 2.a ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MALLAS.

Proyecto: _____ Fecha: _____
 Localización: _____ Sondeo no: _____
 Realizó: _____ Profundidad: _____

SEPARACIÓN POR LA MALLA NO. 4		TES TIGO DE HUMEDAD DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA NO. 4	
Peso total (g) W_m :		Flanera no: _____	
Peso de retenido en no.4 (g) $W_{m1} = W_d1$:		Peso Flan (Wf): _____	
Peso del material que pasa la no.4 (g) W_{m2} :		$W_m + W_f$ (g): _____	
CORRECCION POR HUMEDAD DE LA FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA NO.4		$W_s + W_f$ (g): _____	
$W_d2 = \frac{W_{m2}}{1 + \omega}$		ω : _____	
Peso total corregido $W_d1 + W_d2$ (g) =		TAMAÑO MÁXIMO DE PARTICULA	
		Muestra representativa: _____	
		Muestra corregida: _____	

MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA 4				MATERIAL QUE PASA LA MALLA 4			
Malla no.	Retenido (g)	Retenido (%)	Material que pasa (%)	Malla no.	Retenido (g)	Retenido (%)	Material que pasa (%)
In/mm	(g)	(%)	(%)	No./mm	(g)	(%)	(%)
			100				
3" (76.2)				10 (2)			
2" (50.8)				20 (0.84)			
1 1/2" (36.10)				40 (0.42)			
1" (25.4)				60 (0.25)			
3/4" (19.1)				100 (0.149)			
1/2" (12.7)				200 (0.074)			
3/8" (9.52)				Pasa la 200			
1/4" (6.35)				Suma			
No. 4 (4.76)							
Pasa la 4							
Suma							

Gravas	_____	SUCS
Arenas	_____	_____
Finos	_____	_____

$D_{10} =$ _____ $C_u = D_{60}/D_{10} =$ _____
 $D_{30} =$ _____ $C_c = D_{30}^2 / (D_{60} * D_{10}) =$ _____
 $D_{60} =$ _____



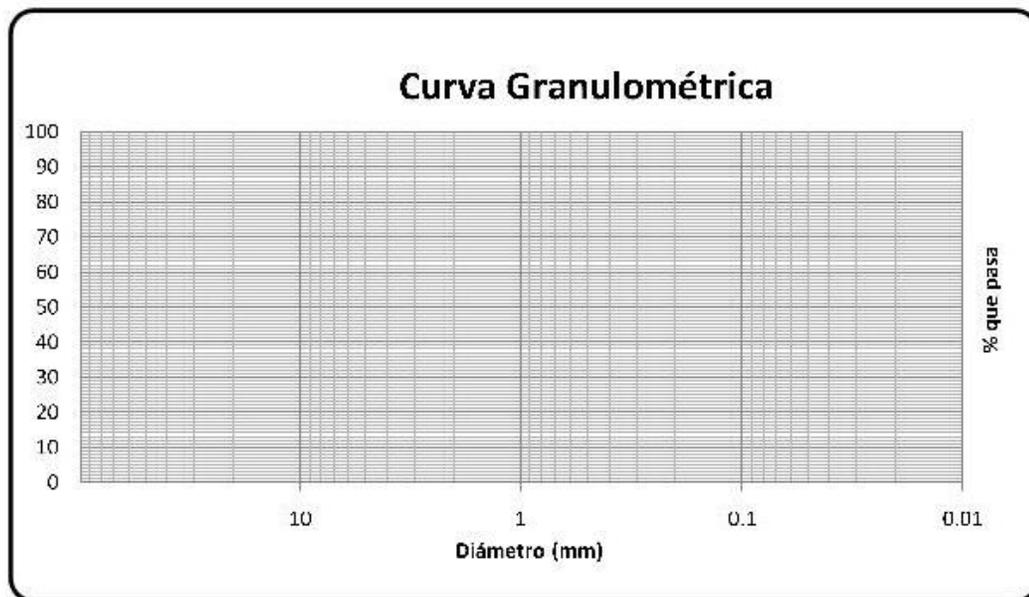
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS I



Formato 2.b
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MALLAS.

Proyecto: _____
Localización: _____
Realizó: _____

Fecha: _____
Sondeo no: _____
Profundidad: _____





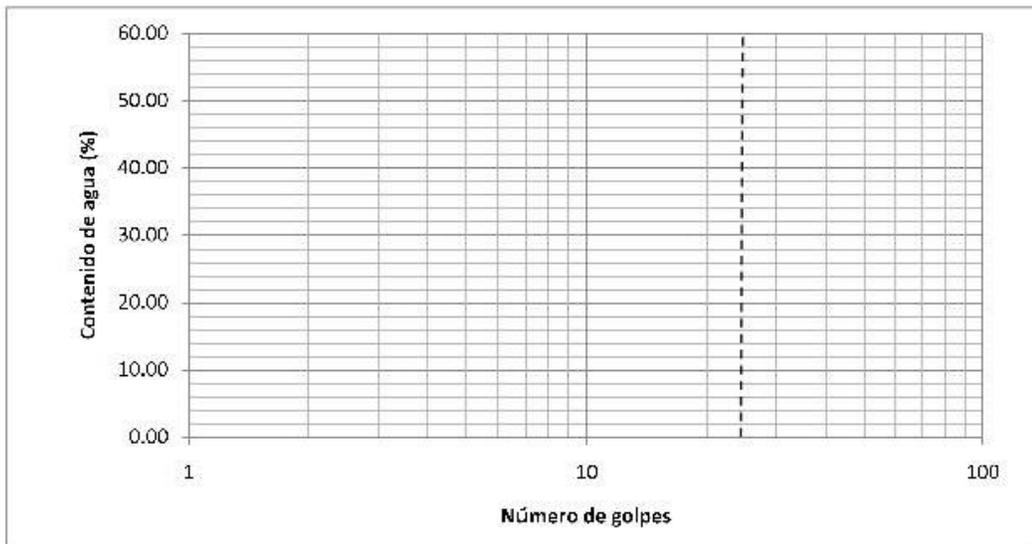
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS
FORMATO 3



DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA.

Proyecto: Trabajo No:
 Localización: Muestra No: Fecha:
 Descripción del suelo: Realizó:
 Profundidad de la muestra:

Límite Líquido (LL)							
Flanera No.	Wf (g)	Wf+Wm (g)	Wf+Ws (g)	Wm (g)	Ws (g)	ω (%)	Golpes No.
Límite Plástico (LP)							



RESUMEN		SUCS
LL		
LP		
I_p		



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS
 FORMATO 4
COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR

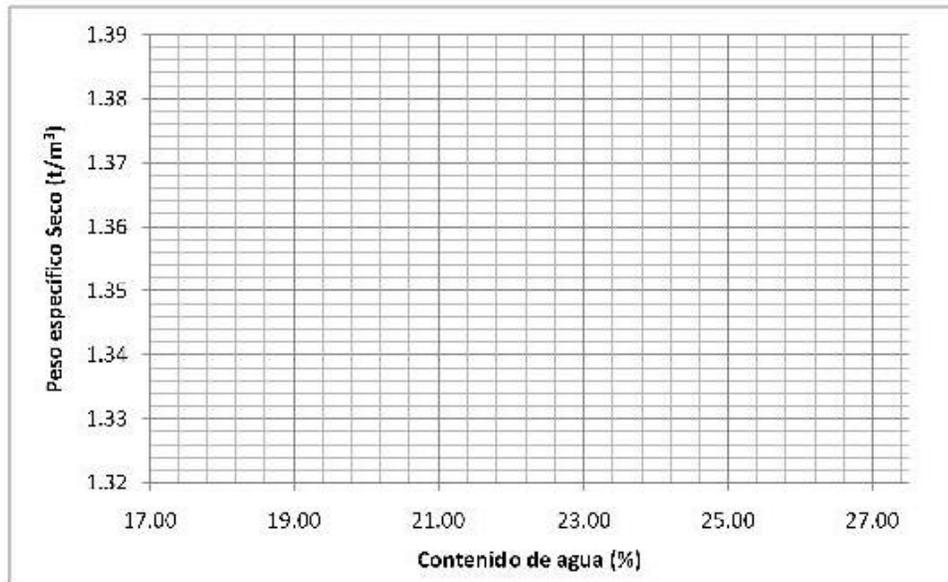


Proyecto: _____ Trabajo No: _____ Fecha: _____
 Localización: _____ Muestra No: _____
 Prof. de muestra: _____ Realizó: _____

Datos de molde y martillo:

Peso martillo: _____ Peso molde: _____ g
 Altura de caída: _____ Vol. Molde: _____ cm³
 N° de capas: _____
 Golpes por capa: _____

Prueba Número	1	2	3	4	5
Peso molde (g)					
Peso molde+suelo húmedo (g)					
Suelo húmedo (g)					
Flanera N°					
Peso flanera (g)					
Peso flanera+suelo húmedo (g)					
Peso flanera+suelo seco (g)					
Suelo húmedo (g)					
Suelo seco (g)					
Humedad (%)					
Humedad promedio (%)					
Peso específico húmedo (t/m ³)					
Peso específico seco (t/m ³)					
Relación de vacíos (e):					





Formato 5
PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE.

Proyecto: _____ Fecha: _____
Realizó: _____ Pozo no. _____
Revisó: _____ Profundidad: _____

Alturas		Diámetros		Area	
L ₁ (cm)=	_____	D _s (cm)=	_____	A(cm ²)=	_____
L ₂ (cm)=	_____	D _c (cm)=	_____	a bureta(cm ²)=	_____
L ₃ (cm)=	_____	D _i (cm)=	_____		
L _{promedio} =	_____	D _{promedio} (cm)=	_____		
γ _m (g/cm ³)=	_____	Peso inicial =	_____	Vol inicial =	_____

Experimento no.	h ₁ * (cm)	h ₂ * (cm)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	h ₁ =h ₁ *-h _c (cm)	h ₂ =h ₂ *-h _c (cm)
1						
2						
3						
4						
5						
		Promedio				

$$k = 2.3 \frac{La}{tA} \log \frac{h_1}{h_2} \left(\frac{cm}{s} \right)$$

Corrección por temperatura (Se obtiene de tabla 9.1)

$$Ct = \frac{\eta_r}{\eta_{20}} =$$

Permeabilidad corregida.

$$k_{corr} = Ct \times k =$$

Donde:

L = Longitud de la trayectoria que sigue el agua dentro de la muestra (cm).

t = tiempo transcurrido, en el cual el agua contenida en la bureta, pasa de un nivel 1 a nivel 2 (cm).

h₁ = Carga hidráulica inicial, es igual a diferencia del nivel de entrada de agua menos el nivel de salida quitándole la altura por ascensión capilar h_c (cm).

h₂ = Carga hidráulica final, que al igual que la anterior es la diferencia del niveles de entrada y salida de agua sin considerar la ascensión capilar h_c. A diferencia al anterior esta carga es la que se obtiene después de cronometrar cierto tiempo (cm).

A = Área transversal de la muestra (cm).

a = Área transversal de la bureta de alimentación de agua (cm²).

h_c = Altura capilar (cm).

h₁* = Altura aparente inicial medida desde la válvula de salida al nivel inicial en la bureta (cm).

h₂* = Altura aparente final medida desde la válvula de salida al nivel final en la bureta alimentadora (cm).

