



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
Ingeniería Civil – Geotecnia

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ESCORIA VOLCÁNICA COMPACTADA
DE LA CIUDAD DE MÉXICO Y SUS ALREDEDORES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
DIEGO ALEJANDRO GONZÁLEZ MARTÍN

TUTOR PRINCIPAL
DR. MANUEL J. MENDOZA LÓPEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA
CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO DE 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Dr. Rivera Constantino Rigoberto.

SECRETARIO: Dr. Flores Castrellón Osvaldo.

VOCAL: Dr. Mendoza López Manuel J.

1ER· SUPLENTE: M.I. Deméneghi Colina Agustín.

2DO· SUPLENTE: Dra. Ossa López Alexandra.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Manuel J. Mendoza L.

FIRMA

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
1.1 Resumen	1
1.2 Introducción.....	3
1.3 Objetivos y alcances	4
1.4 Organización de la investigación	5
1.5 Antecedentes	6
1.6 Algunos conceptos básicos sobre resistencia al esfuerzo cortante.....	9
2. MATERIAL A ESTUDIAR	16
2.1 Selección y muestreo del material.....	16
2.2 Granulometría a utilizar en este estudio.....	22
3. PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS	28
3.1 Descripción del programa de ensayos de laboratorio.	28
3.2 Pruebas para caracterizar el material	29
3.2.1 Límites de plasticidad	29
3.2.2 Equivalente de arena	31
3.2.3 Densidad de sólidos.....	32
3.2.4 Desgaste en la prueba de Los Ángeles	32
3.2.5 Permeabilidad.....	33
3.2.5.1 Sistema desarrollado para realizar las pruebas.....	36
3.2.6 Determinación de la compacidad relativa (Dr).....	40
3.3 Pruebas triaxiales.	44
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	51
4.1 Resultados de las pruebas para caracterizar el material.	51
4.1.1 Límites de plasticidad	51
4.1.2 Equivalente de arena	52
4.1.3 Densidad de sólidos.....	53
4.1.4 Desgaste en la máquina de Los Ángeles	53
4.1.5 Permeabilidad.....	53
4.1.6 Resultados de la determinación de las compacidades.....	56
4.2 Resultado de las pruebas triaxiales.	66
4.2.1 Material de Xaltepec	66
4.2.2 Material de Cerro Grande	75
4.2.3 Material de Tepexpan.....	78

4.3	Comparación de resultados de las pruebas triaxiales.	81
4.3.1	Determinación de ángulos de dilatancia.	93
5.	CONCLUSIONES	100
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	104
7.	ANEXOS	106
7.1	Resultados de límites líquidos.....	106
7.2	Determinación de la densidad de sólidos.....	108
7.3.	Desgaste en la máquina de Los Ángeles.	113
7.4.	Determinación de permeabilidad.....	115

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1 Resumen

Esta investigación nació debido a la falta de información referente a las propiedades mecánicas de la escoria volcánica, conocida localmente como Tezontle. En este trabajo se busca determinar dichas propiedades para algunas escorias de varios bancos de materiales que surten de tezontle a diferentes proyectos en la Ciudad de México y sus alrededores.

Para ello se realizó, primeramente, un trabajo de campo enfocado a conocer, identificar y seleccionar los bancos de materiales que se estudiarían. Luego de haber seleccionado los bancos (Xaltepec y San Rómulo), se hace un muestreo, lo más representativo posible, de tres tipos de tezontle para llevar a cabo pruebas de laboratorio con el fin de caracterizarlos. Dichas pruebas son granulometría, equivalentes de arena, densidad de sólidos, desgaste en máquina de Los Ángeles, pruebas de permeabilidad de carga constante y pruebas de compactación.

Posteriormente, y con el fin de determinar las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante de estas tres escorias, se llevó a cabo un conjunto de pruebas triaxiales en probetas compactadas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, utilizando diferentes compacidades relativas. Estas pruebas se consideran más representativas que las pruebas triaxiales tradicionales ya que se usan tamaños de partículas mayores.

Para uno de los materiales, el proveniente de Xaltepec, se plantearon 3 series de pruebas triaxiales estáticas, cada una de ellas con una compacidad relativa diferente (30, 75 y 95%). Con lo anterior es posible conocer la variación del ángulo de fricción en función de la compacidad relativa. Por otro lado, para determinar si el ángulo de fricción varía en función del tipo de escoria volcánica, se realizó una serie de pruebas triaxiales a cada uno de los otros dos materiales (Cerro Grande y Tepexpan) llevándolos a un valor de compacidad relativa de 75%. Lo anterior con el fin de tener los tres materiales en un mismo valor de compacidad.

Paralelamente, se hizo un análisis donde se vio la variación de los módulos de deformabilidad de cada uno de estas escorias volcánicas en función tanto de los esfuerzos confinantes, como de las diferentes compacidades.

Durante las pruebas se observó que a pesar de la gran porosidad que presentan estos materiales, la resistencia que alcanzan es alta y la rotura de granos, durante procesos de compactación de mediana intensidad, es muy baja, si es que ésta se realiza cuando el material presenta alguna humedad.

Este estudio concluye que la escoria volcánica es un material que gana rigidez y aumenta su peso volumétrico con gran facilidad ya que al compactarse por pocos segundos alcanza un alto porcentaje de su compacidad máxima. En la práctica, esto es de gran ayuda ya que para compactar una capa de este material se requieren pocas pasadas del equipo compactador, por otro lado, si lo que se desea es contar con un material ligero, esta misma característica podría ser el principal inconveniente en lograr pesos volumétricos bajos.

De igual forma se concluye que los materiales acá estudiados poseen altos valores de ángulos de fricción interna, los cuales, bajo ciertas hipótesis, aumentan a medida que la compacidad relativa con la que se trabaje se hace mayor, y disminuyen conforme crece el esfuerzo confinante. Dichos valores altos de resistencia concuerdan con aquellos encontrados por varios investigadores que estudiaron el comportamiento de algunos tezontles en otros sitios de la república mexicana. Adicionalmente, en esta investigación se muestra la forma en la que la dilatancia afecta los ángulos de fricción.

1.2 Introducción

La escoria volcánica es un material que pertenece al grupo de las rocas ígneas extrusivas; se forman a partir de la cristalización magmática, consecuencia de su progresivo enfriamiento en el proceso de ascenso hasta llegar, en la superficie, a la temperatura ambiente; los gases atrapados en su interior tienden a escaparse generando una espuma o burbujas causando así la gran porosidad que caracteriza a este material. Esta escoria volcánica, conocida localmente como tezontle, es un material que abunda en el Valle de México debido a la muy extendida actividad volcánica que allí se presenta. Su uso data de épocas prehispánicas en este valle y fue determinante, en la arquitectura y en la mampostería de la Ciudad de México durante los siglos XVI a XIX para resolver varios problemas constructivos como cimientos, muros, bóvedas, techumbres, terraplenes, etc. Adquirió mayor relevancia durante el siglo XVIII, periodo en que puede afirmarse fue el auge del tezontle (Rodríguez, 2011). Este material comúnmente es de color rojo o gris muy oscuro, es poroso, ligero; a pesar de esto, puede llegar a tener una buena resistencia al esfuerzo cortante, lo que lo hace ideal para diversos fines constructivos. A pesar del uso masivo que se le ha dado y a las grandes ventajas que se conocen de este material, ha sido muy poca la investigación que se ha desarrollado con el objetivo de conocerlo y entender su comportamiento ante diferentes solicitaciones.

En proyectos de ingeniería donde se requiere que un material granular que se usa cumpla con ciertas especificaciones, existe el problema de la falta de información respecto a sus propiedades mecánicas, esto debido a que los equipos necesarios para realizar pruebas en estos suelos son muy escasos, lo que lleva a que, comúnmente, cuando se requieren parámetros de resistencia de materiales granulares, dichos valores se tomen de la literatura o de resultados de las escasas pruebas desarrolladas en otro tipo de materiales granulares.

Las condiciones de terreno muy blando que prevalecen en el sitio de desarrollo del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) y de los tramos de prueba que se han de construir en dicho lugar para monitorear sus comportamientos, exigen la utilización de materiales ligeros en múltiples tareas. La construcción de caminos de acceso, plataformas de trabajo y otros rellenos, han requerido el uso de este material natural que abunda en las inmediaciones de la zona del proyecto.

Del amplio uso y de la presencia de enormes volúmenes de tezontle en la región, surgió la pregunta de si se le podría utilizar como material en la construcción de los terraplenes estructurales que habrían de construirse como parte de los tramos de prueba para el NAICM, específicamente sobre el campo de pilotes de fricción del sistema de terraplén piloteado. Para cumplir con el objetivo de ser un terraplén en el que se propicie el arqueo y la transferencia de carga a los capiteles de los pilotes, se requiere un material constituyente de naturaleza granular, muy competente en términos de resistencia al esfuerzo cortante.

Así pues, nos cuestionamos si el tezontle con granulometrías bien graduadas y compactándolo, tendría la resistencia cortante necesaria para ser utilizado en el cuerpo del terraplén. Desde luego, razonamos que si ello se cumplía, y además era un suelo ligero, resultaba entonces tanto mejor su uso para tal fin. Teníamos ya reportes

(Martínez, 2009 y Padilla, 2013) de la resistencia cortante alta que exhiben las escorias volcánicas, por lo que se decidió emprender una campaña de ensayos triaxiales para poner en evidencia ese supuesto y cuantificar la resistencia de los tezontles a utilizar en el proyecto.

1.3 Objetivos y alcances

El objetivo principal de esta investigación es determinar, mediante pruebas triaxiales, las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante de tres diferentes tipos de escoria volcánica compactada, provenientes de la Ciudad de México y sus alrededores.

Se pretende conocer, para un material, la variación de dichas propiedades en función del grado de compactación o acomodo del material (compacidad relativa). Adicionalmente, se determinarán las propiedades de resistencia de los restantes dos materiales para el valor de compacidad relativa media (75%). De esta forma será posible definir si la procedencia o compacidad del material son factores que inciden en la resistencia de éstos.

Los alcances de este trabajo se centran en:

- Conocer la resistencia a la abrasión de tres tipos de escoria volcánica mediante pruebas de desgaste, prueba de Los Ángeles.
- Obtener las compacidades máximas y mínimas de cada uno de las escorias volcánicas estudiadas.
- Determinar los coeficientes de permeabilidad " k ", en dos tipos de escoria volcánica mediante pruebas de carga constante.
- Analizar el rompimiento de granos generado por la compactación (dinámica) a la que se someten los tres materiales y posteriormente, la debida a las pruebas triaxiales.
- Establecer el comportamiento esfuerzo-deformación de la escoria volcánica compactada (bajo determinadas condiciones de compacidad relativa y humedad) mediante pruebas triaxiales realizadas a probetas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura.
- Determinar la relación existente entre los parámetros: ángulo de fricción interna " ϕ ", **el módulo de deformabilidad " E_{50} "**, la relación de vacíos " e " y pesos volumétricos secos " γ_d ", con la compacidad relativa " D_r " de los materiales y los esfuerzos confinantes usados en las pruebas " σ_c ".
- Deducir los ángulos de dilatancia que se presentan en las pruebas triaxiales, esto para cada uno de los materiales.
- Comparar los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los tres tipos de escoria volcánica y concluir acerca de cómo se afecta la resistencia de estos materiales debido a la compacidad y al tipo de material en sí.

1.4 Organización de la investigación

Con el objetivo de abarcar todos los aspectos que se involucran en esta investigación, el desarrollo de ésta se organiza como se indica a continuación.

El capítulo uno consta de un resumen general de este trabajo, también se hace una recopilación de las principales investigaciones realizadas en materiales granulares y se mencionan los resultados más relevantes encontrados en el campo de resistencia mecánica de escorias volcánicas. De igual forma, se hace una introducción a los conceptos básicos de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.

En el capítulo dos se hace referencia a un estudio realizado por el IIUNAM en el cual se buscó identificar posibles sitios de aprovisionamiento de materiales granulares ligeros para ser usados en terraplenes de prueba en el Ex Lago de Texcoco. Allí mismo se mencionan los bancos de materiales de donde se obtuvo el tezontle usado en esta **investigación, el primero de ellos es la mina "Xaltepec" ubicada al oriente de la Ciudad** de México, en la sierra Santa Catarina; el segundo es el cerro Totolcingo, ubicado al nororiente de la Ciudad, en el municipio San Miguel de Totolcingo, en el estado de México. De igual forma, en este capítulo se define la granulometría del material que se usará en la investigación y se muestra la manera en que se realizó la dosificación y clasificación de éste.

El capítulo tres se centra en definir los ensayos propuestos para caracterizar el material y posteriormente, determinar sus propiedades de resistencia mecánica. Se menciona la forma en que se llevaron a cabo las pruebas de desgaste en la máquina de Los Ángeles, las de compactación (determinación de compacidades mínimas y máximas), las triaxiales en probetas granulares de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura y las pruebas de permeabilidad a carga constante.

Los resultados de esta investigación se encuentran en el capítulo cuatro, allí es posible observar los parámetros de resistencia de los tres tipos de escoria volcánica compactada y la variación éstos en función de las compacidades relativas. De igual forma, se muestra cómo, para un mismo valor de compacidad relativa, estos parámetros varían en función de cada material. Se muestran algunas gráficas donde se plasman las relaciones encontradas entre los ángulos de fricción interna, módulos de deformabilidad, relación de vacíos, pesos volumétricos secos, con las compacidades relativas y esfuerzos confinantes usados. También se presenta el análisis del rompimiento de partículas debido a la compactación y a las pruebas triaxiales.

Por último, se determinan los valores de ángulos de dilatancia que se presentaron en las pruebas de los tres materiales.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos, es posible concluir del comportamiento que presentan estos tipos de materiales así como de la heterogeneidad que existe entre ellos.

1.5 Antecedentes

La escoria volcánica es un material que, a pesar de su uso común en diferentes proyectos de ingeniería en la Ciudad de México y sus alrededores, no se ha estudiado a profundidad; razón por la cual la bibliografía referente al comportamiento mecánico de este material es escasa.

Samaniego-Martínez (2005) realizó pruebas con picnómetro para determinar la densidad de un tipo de escoria volcánica, esto para demostrar que las metodologías tradicionales que se usan para obtener dicha propiedad en laboratorio, no son adecuadas para este material debido a las pequeñas vesículas aisladas de la atmósfera que éste presenta.

Dichas pruebas se hicieron a partículas de tezontle cuyos tamaños iban desde 2 hasta 4.75 mm. La escoria fue dividida en cinco muestras mismas que fueron separadas por tamaños, a cada tamaño se le determinó la densidad basado en el procedimiento propuesto por McIntyre (1974), en el cual se introduce la muestra de material en un picnómetro y se somete a vacío, seguidamente, se agrega agua destilada lentamente hasta que se cubra la muestra, esto sin detener el vacío, para ello se requiere un arreglo particular del sistema. Los resultados indicaron que para la escoria con tamaños menores a 4.75 mm la densidad fue de 2.55 g/cm³, para la escoria cuyo tamaño es menor a 2 mm, la densidad fue de 2.61 g/cm³, y valores mayores a 2.79 g/cm³ para la fracción más fina de este tezontle.

Martínez (2009) realizó un estudio a diferentes tipos de tezontle existente en el estado de Michoacán caracterizándolos física y mecánicamente para conocer sus propiedades mecánicas. En esta investigación trabajó con dos diferentes granulometrías, una bien gradada y otra mal gradada, y con diferentes contenidos de agua. Realizó pruebas triaxiales con probetas de 7 cm de diámetro y 15 cm de altura, lo que limitó el tamaño máximo de granos ensayados. Los confinamientos usados no fueron mayores a 58.8 kPa. En este trabajo se obtuvieron curvas esfuerzo-deformación de los materiales ensayados y se determinaron sus ángulos de fricción, los cuales resultan ser siempre mayores a 40°.

Padilla (2013) estudiando el comportamiento de un pavimento de larga duración con un diseño no convencional, describe las actividades desarrolladas para el proyecto: construcción y estudios del comportamiento de un tramo de la autopista Guadalajara – Colima en su cruce con dos zonas lacustres. En este proyecto se realizaron estudios básicos a diferentes tipos de escoria volcánica, tales como: determinación de pesos volumétricos secos y húmedos varillados, así como propiedades índice. Como parte de este proyecto, se llevó a cabo la construcción de terraplenes de prueba con distintos tipos de tezontle, se estudiaron los procedimientos constructivos y se analizaron los resultados obtenidos del comportamiento y de las actividades de mantenimiento que cubren 28 años de operación. Tras esto, se concluyó que el comportamiento de este tramo de prueba ha sido muy satisfactorio y similar al de los pavimentos asfálticos de larga duración.

Por otra parte, el estudio del comportamiento de materiales granulares y el rompimiento de granos ha sido más amplio, por lo que existe mayor información referente a este tema. A continuación se mencionan algunas investigaciones relevantes al respecto.

Roberts y De Souza (1958) ensayaron diferentes tipos de arenas y dedujeron que aquellas con formas angulosas se rompían más fácilmente que las redondeadas ante presiones bajas, causando así mayores deformaciones y asentamientos. Esta diferencia en el comportamiento, debida a la forma de las arenas, tiende a desaparecer a medida que las presiones se vuelven cada vez más altas. Lo anterior fue verificado por Lee y Farhoomand (1967) al realizar pruebas triaxiales en gravas y arenas tanto redondeadas

como angulosas. En esta última investigación se concluyó además, que el aumento de en la rotura de granos crece al aumentar los esfuerzos confinantes.

Terzaghi (1960) mediante pruebas de compresibilidad, puedo observar que las grandes deformaciones que se presentan en materiales granulares, sometidas a altas presiones, se debe primordialmente al rompimiento que se presenta en los granos conforme aumenta la presión en sus contactos, causando así un reacomodo de la estructura en general.

Hall y Gordon (1963) (citado por Chávez, 1996) llevaron a cabo pruebas triaxiales **drenadas en diferentes tipos de suelos granulares con tamaños máximos de 3" y** presiones de confinamiento de hasta 45 kg/cm². La conclusión más importante a la que llegaron fue que, si se ensaya una probeta con granulometría uniforme, la mayor cantidad de rotura de granos se presenta durante la etapa de falla.

Sowers (1965) a través de ensayos de compresión unidimensional en distintos tipos de materiales granulares con tamaños máximos de 3.8 cm, dedujo que existe un rápido incremento de la deformación del material al aplicar cada incremento de carga, posteriormente, observaron un proceso de deformación diferido en el tiempo. Adicional a lo anterior, mediante análisis granulométrico de las muestras antes y después de los ensayos, concluyeron que una granulometría uniforme (mal gradada), produce un material más compresible con mayor rotura de granos.

Marsal, R (1971) mediante pruebas triaxiales en una cámara de 1.13 m de diámetro y una altura de 2.5 m con presiones de confinamiento máximas de 25 kg/cm², encontró que las relaciones esfuerzo-deformación en compresión triaxial son no lineales y que el módulo tangente de deformación varía durante los procesos de carga y descarga. De igual forma, vio que los materiales granulares en estado denso, ensayados con niveles de esfuerzo bajos, exhiben un máximo de deformación relativamente pequeña; al incrementarse ésta, la resistencia a cortante disminuye hasta que alcanza un valor residual. El mismo material formado con un grado de compactación bajo, no presenta el máximo de resistencia antes citado.

De igual forma, pudo establecer que en general la envolvente de resistencia al cortante de un material granular es una curva para esfuerzos normales pequeños y, a partir de un cierto valor, que depende de la granulometría y la compacidad inicial, dicha variación es lineal. La relación de los esfuerzos normal y tangencial para la falla es función de la forma de los granos, la fricción intergranular media y las fuerzas normales en los contactos de los granos; debido a ello, a menores valores de confinamiento existen menores fuerzas normales entre granos lo que hace que aumente la resistencia al corte.

En esta misma investigación, se reportó que la ruptura de granos varía no solo con las dimensiones de dichos granos, sino también con los defectos que éstos puedan tener en su estructura interna. Así mismo, dedujo que esta ruptura afecta en forma notoria la resistencia y las relaciones esfuerzo-deformación de un material, ya que la fragmentación produce cambios en la granulometría. Con ella se abren nuevas posibilidades a la ocupación de los vacíos dentro del suelo, lo cual se traduce en un aumento en la compresibilidad y por ende, debe esperarse un incremento relativo en la resistencia del suelo.

Marsal, R (1972) con el fin de determinar, en forma preliminar, la solidez de enrocamientos, gravas y arenas, propuso la realización las siguientes pruebas que se considerarían índice; absorción de agua, desgaste o abrasión en la máquina de Los Ángeles, intemperismo acelerado bajo la acción de sulfato de sodio y una prueba en la que se somete los fragmentos de roca o las gravas a estados de esfuerzos (fuerzas concentradas en los contactos y condiciones de apoyo diversas). De esta última prueba se obtiene un valor denominado "**Pa**" (carga de rotura).

Verdugo y de la Hoz (2005) desarrollaron una investigación en la cual presentan resultados experimentales obtenidos en cinco suelos gruesos, aplicando la técnica de la gradación homotética, la cual consiste en ensayar muestras con una curva granulométrica paralela a la del material grueso original que se desea evaluar, es decir, una muestra equivalente de menor tamaño. Estas pruebas muestran la aplicabilidad y limitaciones de esta metodología. Adicionalmente, describen la técnica de extracción de **probetas "inalteradas" de 60 cm de diámetro por 120 cm de altura en un suelo gravoso y se presentan los resultados obtenidos en ensayos triaxiales CD como parámetros de resistencia al corte y coeficiente de empuje horizontal en reposo "K₀".**

Con el objetivo de analizar la estabilidad de taludes compuestos por mezclas de gravas, arenas y fragmentos de rocas, Vallejo (2014) llevó a cabo una investigación con el fin de determinar la resistencia al esfuerzo cortante de una mezcla de arena de Ottawa y gravas finas, lo anterior mediante ensayos de corte directo. La resistencia al esfuerzo cortante se midió bajo dos esfuerzos normales 52 y 103 kPa.

En este estudio se encontró que el ángulo de fricción interna se hace mayor al aumentar la concentración de gravas en la mezcla. El ángulo de fricción de la arena sola fue de 40.4°, mismo que aumenta a 46.9° cuando se trabaja con una mezcla donde existe una concentración del 20% de gravas. Se concluyó que la resistencia al corte de un material arena-grava puede determinarse a partir de la resistencia al corte de la arena sola y conociendo la concentración, en volumen, de gravas en la mezcla usando la siguiente ecuación. Cabe aclarar que esta ecuación representó de buena manera los resultados del material acá estudiado, las condiciones de esfuerzo y el equipo usado sea general; no obstante, no se ha determinado su validez en general.

$$Sc = Sm (1 + 2.5 C)$$

Donde:

Sc: resistencia al corte de la mezcla arena-grava, kPa.

Sm: resistencia al corte de la arena sola. kPa.

C: concentración en volumen de grava dentro de la mezcla, %.

De estas investigaciones se concluyó que las formas angulosas, aplanadas y la rugosidad de las partículas incrementan la resistencia al esfuerzo cortante pero de igual forma aumentan la compresibilidad de la masa granular.

Cuando se hacen pruebas triaxiales a materiales gruesos con niveles de esfuerzo medio a altos, el rompimiento de partículas es un fenómeno que se debe tener en cuenta, ya que se genera un cambio en la curva granulométrica lo que afecta sus propiedades mecánicas. Además de los grandes niveles de esfuerzos, la heterogeneidad, defectos como fisuras, resistencia a la tensión y contacto entre granos, son otros factores que intervienen en el rompimiento de éstas.

Las anteriores son tan solo algunas de las investigaciones que se han desarrollado en materiales granulares. Como se ve, la mayoría de ellas hacen referencia al rompimiento de partículas al llevar a cabo pruebas de resistencia, sin embargo, en cuanto a investigaciones relacionadas con el comportamiento de escorias volcánicas no es fácil encontrar información adicional a la acá mencionada. Razón por la cual esta investigación pretende sentar las bases para así seguir con los trabajos encaminados a conocer mejor el comportamiento de este material, cuyo uso es masivo en la Ciudad de México y sus alrededores.

1.6 Algunos conceptos básicos sobre resistencia al esfuerzo cortante

A continuación se hace una breve revisión de algunos conceptos importantes referentes a la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.

La resistencia al esfuerzo cortante de un suelo es la capacidad que éste tiene para soportar los esfuerzos que se presentan en su estructura debido a la aplicación de cargas externas, al rebasarse dicha capacidad se sobrepasa la resistencia del material y empiezan a existir deformaciones importantes en la masa de suelo

No todos los suelos se comportan igual ante cargas externas, existen algunas clasificaciones en función del tipo de material, la cohesión que presentan, entre otros factores.

Una clasificación muy general es la que en un grupo encasilla a las arenas sueltas y a las arcillas **normalmente consolidadas o ligeramente consolidadas ($OCR \leq 2$)** y en otro grupo a las arenas densas y a las arcillas preconsolidadas ($OCR > 2$).

El primer grupo (suelos tipo 1) presenta un incremento en el esfuerzo cortante a medida que las deformaciones crecen hasta el punto en el que el esfuerzo cortante se mantiene constante y la deformación crece, a este estado se le conoce como estado crítico (τ_{cs}), (ver Figura 1.1 a). El material se vuelve cada vez más denso hasta llegar a una relación de vacíos constante (e_{cs}) que es llamada relación de vacíos crítica (Figura 1.1 a y c). Por otro lado, los suelos tipo 2 presentan un incremento en la resistencia hasta alcanzar un valor pico (τ_p) con una deformación relativamente pequeña, después de alcanzar este valor muestran un descenso en la resistencia y tienden a llegar al valor τ_{cs} . Algunas veces estos suelos presentan zonas similares a planos de falla predefinidos y tienen un comportamiento como el que se muestra en la Figura 1.1 a, se les denomina suelos tipo 2A. Tienen un comportamiento que tiende a una resistencia residual (τ_r). Este tipo de suelos inicialmente se comprimen y después se expanden como se puede ver en la Figura 1.1 b (Budhu, 2011).

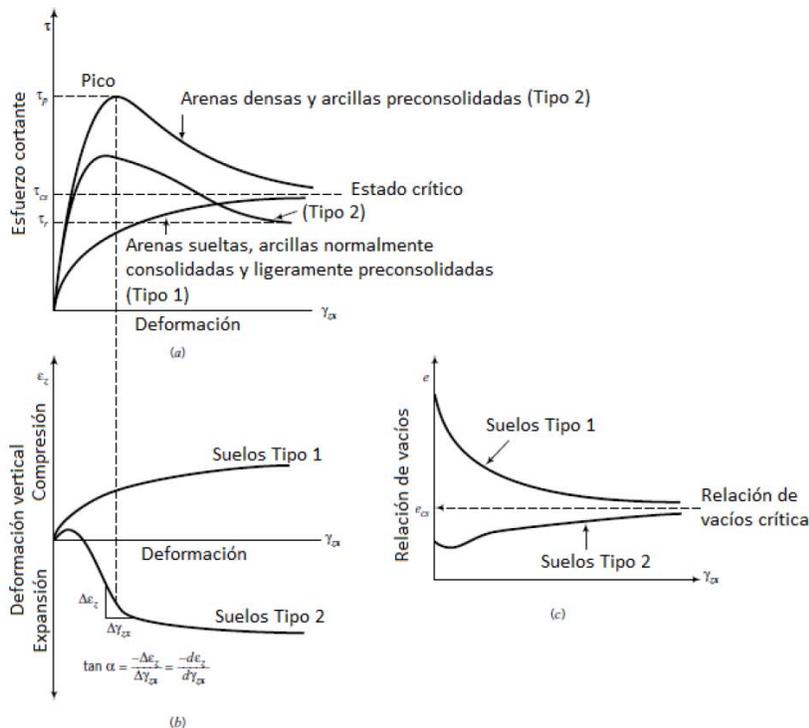


Figura 1.1. Comportamiento de diferentes tipos de materiales (Budhu, 2011)

Efectos del incremento del esfuerzo normal en la resistencia al esfuerzo cortante

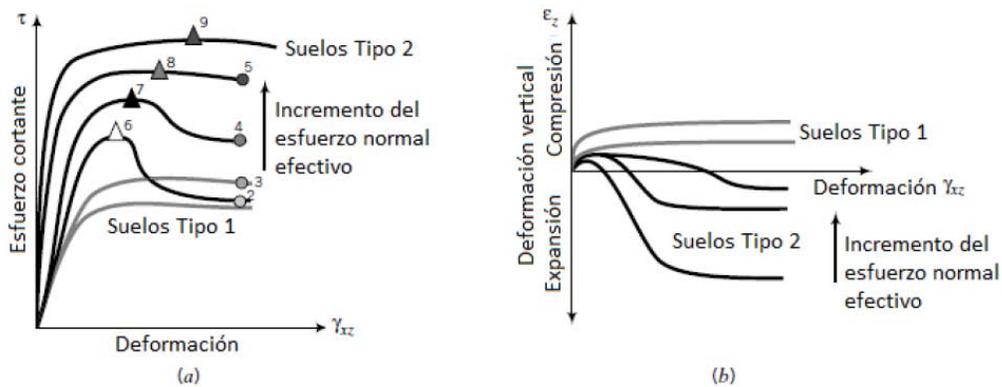
En pruebas para determinar las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante de los diferentes tipos de suelos, al incrementar el esfuerzo efectivo normal se observan las siguientes características:

- En un suelo tipo 1 se observa un incremento del esfuerzo obtenido en el estado crítico (ver Figura 1.2 a).
- Para los suelos tipo 2, se presenta la desaparición gradual del comportamiento denominado pico, (ver Figura 1.2 a). Además, el esfuerzo en el estado crítico se incrementa y el cambio de volumen en la etapa de expansión disminuye (Figura 1.2 b).

Si se determinan las envolventes de falla basándose tanto en las resistencias pico como en las del estado crítico, se obtiene:

- Una envolvente curva (OBCA, Figura 1.2 c) que une los valores pico de resistencia para los suelos tipo 2. A la parte OBC de dicha envolvente (la parte curva) se le denomina la envolvente de resistencias picos.
- Una envolvente recta (OA, Figura 1.2 c) que une todos los valores de resistencia en el estado crítico de los suelos tipo 1 y tipo 2. Al ángulo entre la línea OA y el eje de las deformaciones se le denomina ángulo de fricción interna crítico " ϕ_{cs} ".

Al aumentar los esfuerzos normales efectivos el pico tiende a desaparecer, desarrollándose solamente la resistencia en estado crítico, la cual se muestra como el punto 9 localizado en la recta OA. Para suelos tipo 2-A, la resistencia al esfuerzo cortante residual cae sobre la línea OD la cual se encuentra por debajo de OA. El ángulo entre el eje de las deformaciones y la recta OD se denomina ángulo de fricción residual " ϕ_r ". Al incrementar el esfuerzo normal la relación de vacíos crítica disminuye. Por ende, es posible afirmar que la relación de vacíos es función de la magnitud del esfuerzo normal (Budhu, 2011).



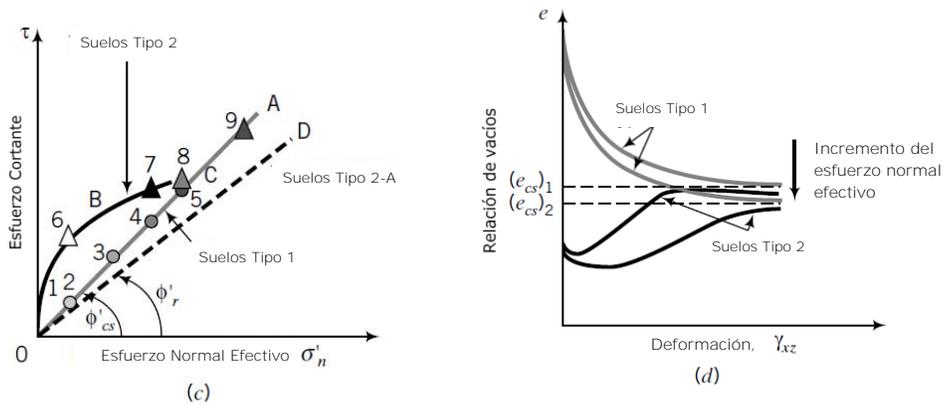


Figura 1.2. Efectos del incremento del esfuerzo normal en la resistencia al esfuerzo cortante (Budhu, 2011)

Modelos para analizar la resistencia al esfuerzo cortante

Criterio de Coulomb

Además de los contactos entre partículas, que son potenciales superficies de deslizamiento, algunos suelos por naturaleza cuentan con planos de deslizamiento. El aplicar cargas al suelo puede causar que algunas micro superficies de deslizamiento se alineen en la dirección que ofrezca menor resistencia, formando una superficie o un plano de menor resistencia, sin embargo, en los suelos no es fácil saber dónde se ubica dicha superficie.

Al analizar el movimiento de las partículas dentro de una masa de suelo (ver Figura 1.3) se llega a que en términos de esfuerzos, la ley de Coulomb se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_f = (\sigma'_n)_f * \tan(\phi')$$

Donde:

- τ_f : valor de esfuerzo cortante al iniciar la falla.
- $(\sigma'_n)_f$: esfuerzo efectivo normal bajo el cual se inicia la falla.
- ϕ' : ángulo de fricción interno, en términos de esfuerzos efectivos.



Figura 1.3. Superficie de deslizamiento en una masa de suelo

Si la ecuación anterior se representa en una gráfica de esfuerzo cortante, contra esfuerzo normal efectivo, se obtiene una línea como la recta OA de la Figura 1.2 c, si $\phi' = \phi'_{cs}$.

Para conocer el comportamiento de los materiales que presentan picos de resistencia, se simulan dos arreglos de partículas, una muy densa y otra poco densa.

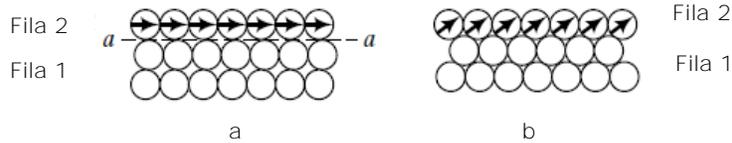


Figura 1.4. a) Arreglo poco denso b) Arreglo muy denso (Budhu, 2011)

Si se empuja la fila 2 en relación a la fila 1 como se muestra en la Figura 1.4, en el arreglo menos denso el movimiento se inicia en el plano horizontal *a-a* consistente con la ley de Coulomb; y su resistencia al esfuerzo cortante queda definida por la ecuación que representa dicha ley.

En el arreglo más denso, el desplazamiento de la fila 2 sobre la fila 1 se ve restringido por el entramado de las partículas. El desplazamiento se iniciaría en un plano inclinado un ángulo α respecto a la horizontal, y no en uno horizontal; en este caso las partículas deben montarse unas sobre otras, a dicho fenómeno se le denomina expansión o dilatancia (Budhu, 2011).

Luego de analizar físicamente dicho fenómeno se llega a que, en función de esfuerzos efectivos, la resistencia al esfuerzo cortante de este tipo de suelo queda definida por la siguiente ecuación:

$$\tau_f = (\sigma'_n)_f * \tan(\phi' + \alpha)$$

Con base en esta ecuación es posible afirmar que si el ángulo α aumenta la resistencia al esfuerzo cortante se incrementa. Si el esfuerzo normal se incrementa en el arreglo más denso, la capacidad de las partículas de montarse unas sobre otras disminuye, es tan así, que es posible imponer un esfuerzo normal tan alto que haga que este efecto desaparezca. Por tanto, la habilidad de expansión de las partículas depende de la magnitud del esfuerzo normal. En cuanto menor sea el esfuerzo normal efectivo mayor será el valor del ángulo α . El efecto de la variación de este ángulo en función del esfuerzo normal en la envolvente de falla, es la curvatura en su parte inicial, como se mostró en la Figura 1.2 c, en la parte OBC, o en la Figura 1.5 (Budhu, 2011).

La forma general de esta ecuación es:

$$\tau_f = (\sigma'_n)_f * \tan(\phi' \pm \alpha)$$

Al ángulo α se le denomina "ángulo de dilatancia", es una medida del cambio de deformación volumétrica con respecto al cambio de la deformación angular. Los suelos que tienen valores positivos se refieren a los materiales que se expanden durante el

proceso de la falla, o sea que presentan dilatancia, mientras que los suelos con valores negativos se contraen durante este proceso.

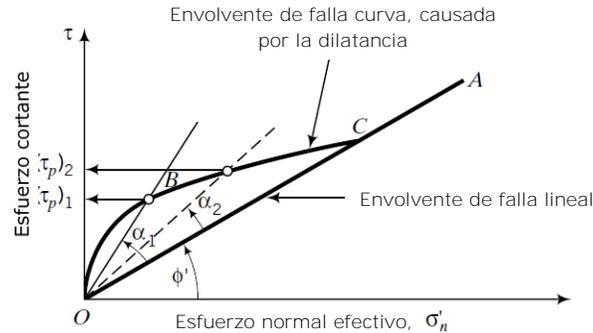


Figura 1.5. Efecto de la dilatancia en la envolvente de falla (Budhu, 2011)

Al usar un círculo de Mohr (de deformaciones) (Figura 1.6) para determinar el ángulo α se obtiene:

$$\alpha = \text{sen}^{-1} \left(-\frac{\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_3} \right) = \text{sen}^{-1} \left(-\frac{\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_3}{(\Delta\gamma_{zx})_{max}} \right)$$

El signo negativo se usa porque se desea que el ángulo de fricción sea positivo cuando el material se expande.

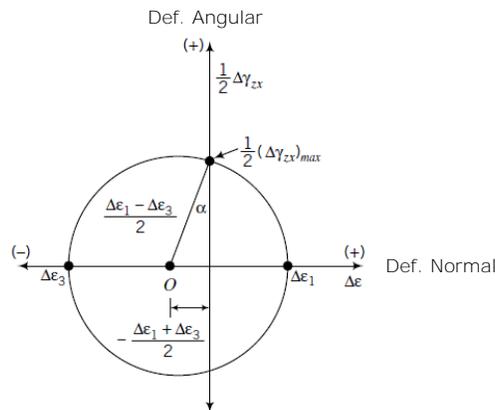


Figura 1.6. Simulación de la falla en el arreglo más denso (Budhu, 2011)

Si el suelo se contrae lateralmente, el ángulo de dilatancia es representado, como se muestra en la Figura 1.1, con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{-\Delta z}{\Delta x} \right)$$

El modelo de Coulomb aplica estrictamente a suelos donde la falla se presenta a lo largo de una superficie, como una junta entre dos materiales o la interfaz entre un sólido y una estructura. Depósitos de suelos estratificados son apropiados para modelarse con el método de Coulomb (Budhu, 2011).

Criterio de Mohr-Coulomb

La ley friccional de Coulomb para encontrar la resistencia al esfuerzo cortante de suelos requiere que se conozca el ángulo de fricción y esfuerzo normal efectivo en la superficie de desplazamiento. Estos dos parámetros son difíciles de conocer en la realidad porque los suelos están sometidos a una gran variedad de esfuerzos. Los círculos de Mohr pueden ser usados para determinar el estado de esfuerzos dentro de una masa de suelo. Al combinar los círculos de Mohr para encontrar el estado de esfuerzos y la ley de Coulomb es posible generar un criterio de falla generalizado (Budhu, 2011).

Si se dibuja la envolvente de falla de Coulomb, recta AB en la Figura 1.7, junto con un círculo de Mohr que toca la envolvente en un solo punto, el cual es función de los esfuerzos principales mayor y menor en la falla, que son $(\sigma_1)_f$ y $(\sigma_3)_f$, es posible determinar la relación entre los esfuerzos principales y el ángulo de fricción en la falla.

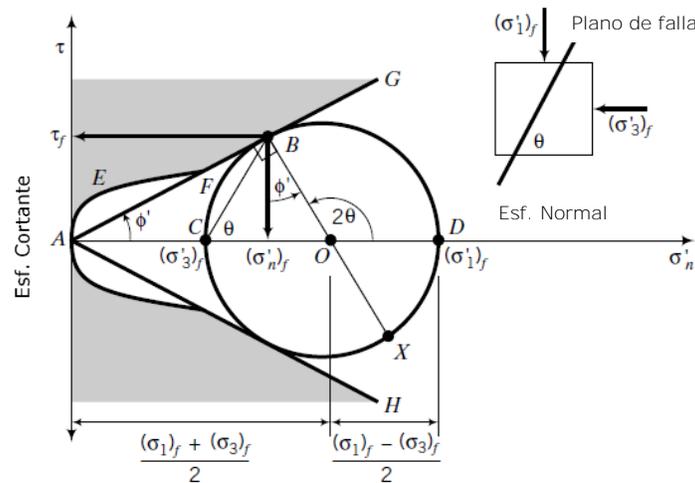


FIGURE 10.14 The Mohr–Coulomb failure envelope.
 Figura 1.7. Envolvente de Mohr-Coulomb, (Budhu, 2011).

$$\text{sen } \phi' = \frac{OB}{OA} = \frac{(\phi'_1)_f - (\phi'_3)_f}{(\phi'_1)_f + (\phi'_3)_f}$$

El criterio de falla de Mohr-Coulomb limita los estados de esfuerzos dentro de la masa de suelo, las áreas sombreadas son llamadas regiones de imposible estado de esfuerzos. Para suelos dilatantes, la frontera curva para posibles estados es la envolvente AEFB.

Este criterio asume que ocurre poca deformación de la masa de suelo previo a la falla. El material alcanza la resistencia pico cerca del 2% de la deformación unitaria y la deformación que genera el estado crítico se alcanza cerca del 10%.

El valor del ángulo de fricción en estado crítico ϕ'_{cs} es constante para un suelo sin importar su estado inicial ni la magnitud de esfuerzo normal efectivo. Pero el valor del ángulo de fricción determinado con los comportamientos pico ϕ'_p depende del esfuerzo normal.

Se describe un material como material contractivo cuando exhiben un pico en su comportamiento esfuerzo-deformación, $\alpha > 0$.

La resistencia al esfuerzo cortante es el resultado de una combinación de resistencias debido a la fricción entre partículas, efectos de la dilatancia, rompimiento de partículas y reacomodo de éstas. A bajos valores de esfuerzos, el reacomodo de partículas y la dilatancia son los factores de mayor relevancia, mientras que con altos valores de esfuerzos el rompimiento de partículas es lo más importante. A pesar de lo anterior, es difícil poder cuantificar y diferenciar cada uno de estos fenómenos, por tal razón, se asume que la resistencia de un material granular es solo una combinación de la fricción entre partículas y de la dilatancia, ver Figura 1.8 (Budhu, 2011).

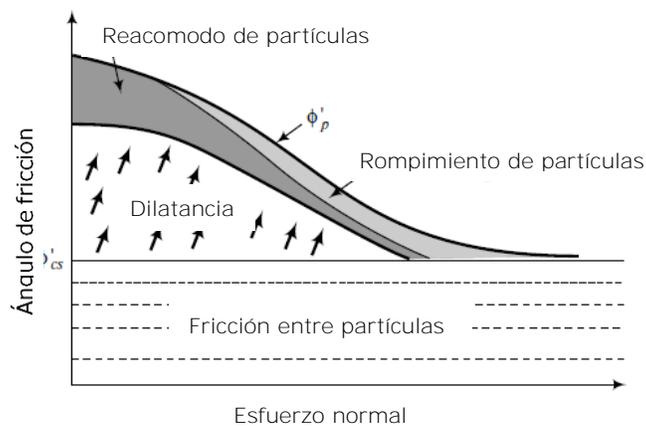


Figura 1.8. Envolvente de Mohr-Coulomb (Budhu, 2011).

Luego de lo anterior, es posible concluir que al analizar los comportamientos picos de los materiales, el ángulo de fricción se compone del ángulo de fricción en estado crítico y el ángulo de dilatancia, para un determinado valor de esfuerzo.

$$\phi'_p = \phi'_{cs} + \alpha_p$$

Algunos valores típicos de ángulos de fricción se muestran en la Tabla 1.1. Se ha encontrado que los valores de ángulos de dilatancia comúnmente varían entre 0 y 15°.

Tabla 1.1 Rango de valores de ángulos de fricción para algunos materiales (Budhu, 2011)

Tipo de Suelo	ϕ'_{cs}	ϕ'_p	ϕ'_r
Gravas	30-35	35-50	
Mezclas de gravas y arenas	28-33	30-40	
Arenas	27-37*	32-50	
Arenas limosas	24-32	27-35	
Arcillas	15-30	20-30	5-15

En arenas con gran cantidad de feldespatos, se encuentra valores más altos de ángulos de fricción en estado crítico.

2. MATERIAL A ESTUDIAR

2.1 Selección y muestreo del material

Con el fin de identificar posibles sitios de aprovisionamiento de materiales granulares ligeros a emplearse en los terraplenes de prueba en el Ex lago de Texcoco, el Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó una exploración de varios bancos de tezontle en la Ciudad de México y sus proximidades. Tras lo anterior, y con el objetivo de seleccionar el material para realizar esta investigación, se decidió muestrear la escoria volcánica existente en dos de estos lugares visitados (ver Figura 2.1).

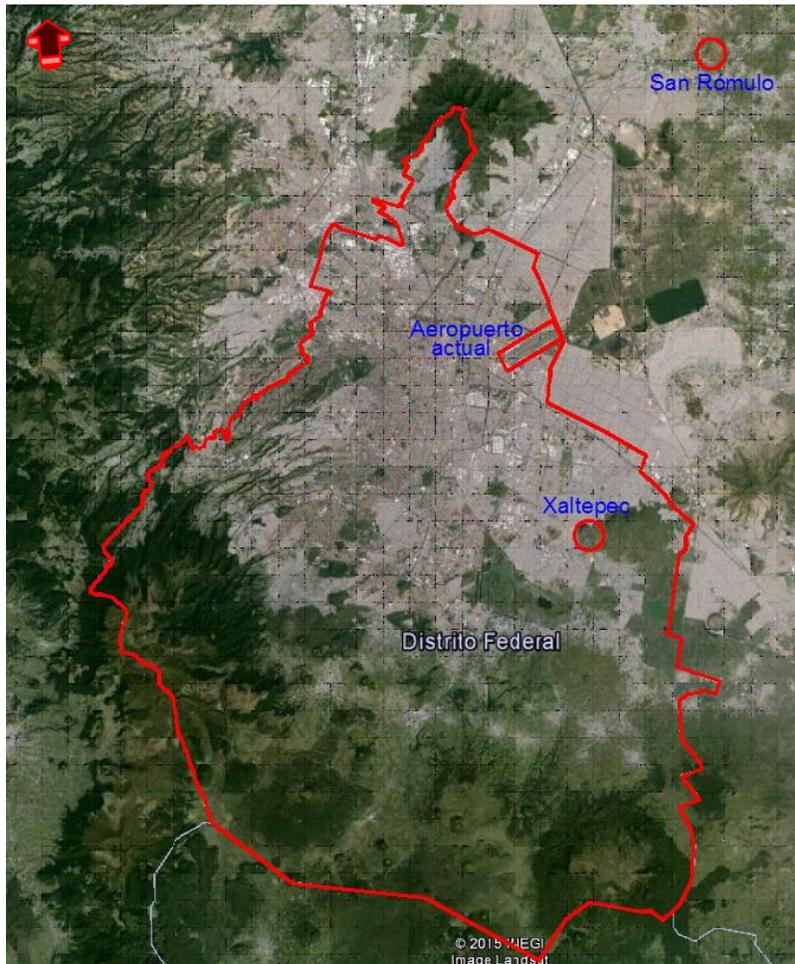


Figura 2.1. Ubicación general de los bancos de material a estudiar (Google Earth)

El primero de ellos es el banco de materiales ubicado en el cerro Xaltepec, al oriente de la Ciudad de México, en la Sierra Santa Catarina (ver Figura 2.2 y Figura 2.3). Este banco se explota en varios frentes, el material estudiado provino de la beta con mayores dimensiones debido a que de dicha beta se obtuvo el material que fue usado, mayormente, en la construcción de los terraplenes de prueba del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM).



Figura 2.2. Ubicación general de la Sierra Santa Catarina (Secretaría de Protección Civil)

En este lugar existe una explotación constante de escoria volcánica, el muestreo se realizó aleatoriamente sobre el material que se estaba explotando en dicho momento. Con ayuda de un cargador mecánico se dispuso el material en forma de cono, el cual se traspaleó varias veces para tratar de mezclarlo y poder obtener una muestra que pudiera considerarse representativa (ver Figura 2.4 y Figura 2.5). Se muestrearon un total de 500 kg de tezontle, aproximadamente.

En el material que allí se extrae predomina la presencia de una coloración rojiza; en otros puntos, dentro del mismo banco, la escoria tiende a ser más oscura y teñirse de negro, como se puede apreciar en la Figura 2.4 La diferencia de color se debe principalmente a la variación que existe en los contenidos de sílice y aluminio



Figura 2.3. Localización del sitio de muestreo (Google Earth)



Figura 2.4. Selección del sitio para muestreo



Figura 2.5. Muestreo del material

El banco de tezontle de "Xaltepec" se ubica en la región oriental de la cuenca de México, la cual se localiza en una estructura de graben desarrollada durante el Oligoceno, donde una gruesa secuencia de materiales volcánicos y lacustres fueron depositados. La cuenca fue cerrada durante el Pleistoceno como resultado de una serie de actividades volcánicas. La unidad geológica más profunda en esta cuenca, observada en afloramientos más allá del límite sur de ésta, está constituida por calizas, areniscas y esquistos. A esta secuencia la sobreyace una unidad volcánica del Terciario Medio que incluye material clástico del Eoceno, basaltos y riolitas del Oligoceno y andesitas del Mioceno con un espesor total de aproximadamente 300 m. Los depósitos de Plioceno inferior están representados por material piroclástico y lacustre con un espesor de alrededor de 600 m (SEDESOL, 2011).

El segundo banco estudiado, de donde se obtuvieron dos tipos diferentes de escoria volcánica, se ubica en el cerro Totolcingo en el municipio de San Miguel de Totolcingo, ubicado al nororiente de la Ciudad de México (Ver Figura 2.1 y Figura 2.6).

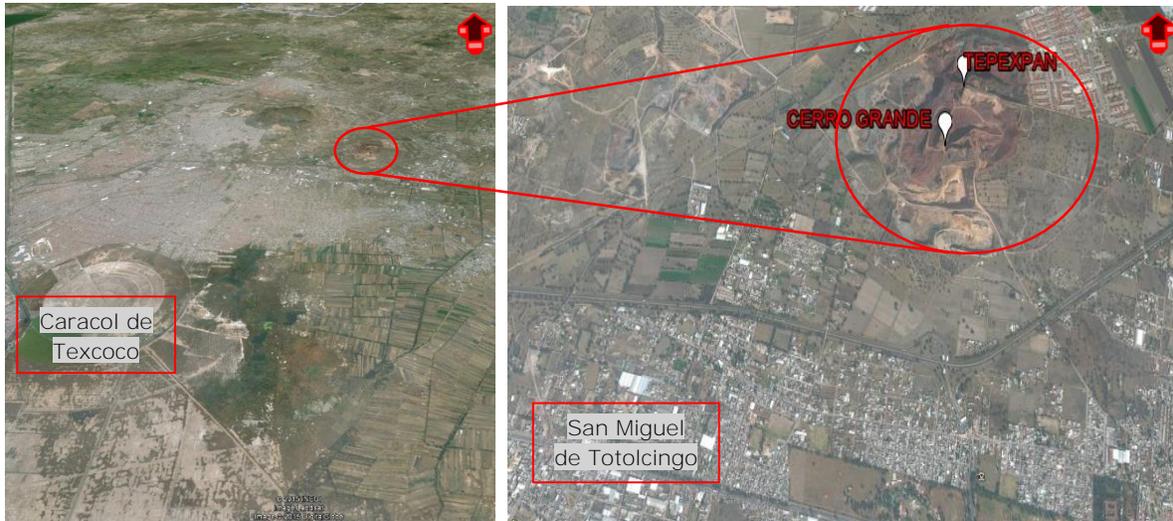


Figura 2.6. Ubicación del Cerro Totolcingo (Google Earth)

Este cerro es un pequeño cono escoriáceo de aproximadamente 100 m de altura, su forma es la de un cono truncado con base casi circular de unos 800 m de diámetro, su cima algo irregular está contenida en una circunferencia de unos 400 m de diámetro, en la que destaca su cráter abierto hacia el oriente. El cono está formado por una sucesión de capas inclinadas de tezontle, cenizas y algunas pequeñas lenguas de lava, todos ellos expulsados en el Cuaternario superior; este pequeño cono volcánico se formó a los pies meridionales del cerro Chiconautla, por lo que descansa sobre los productos eruptivos de ese otro cono volcánico.

Este cono ha sido y sigue siendo intensamente explotado, de él se han extraído importantes volúmenes de tezontle, cenizas y roca basáltica, por lo que su cono original presenta grandes y profundas excavaciones. Se estima que los materiales volcánicos se extienden más profundamente que la base del cono, por lo que los volúmenes de materiales explotables son mayores a aquellos representados por el cuerpo del cono.

En este lugar se encuentran dos diferentes frentes de explotación de escoria volcánica; localmente a estos sitios se les conoce como Cerro Grande (material oscuro) y Cerro Tepexpan (material de color rojo).

El frente Cerro Grande no se encuentra activo actualmente, aunque presenta evidencia de actividad reciente. El muestro en este sitio se realizó tomando el material que se encontró en la superficie, en los taludes y en el pie de los mismos.

Posteriormente, se mezclaron en un cono y de allí se tomó una muestra representativa de alrededor de 200 kg. El tamaño máximo de escoria volcánica en este sitio puede afirmarse que es de 1" o quizás hasta 1½", no mucho más que eso. (Ver Figura 2.7)

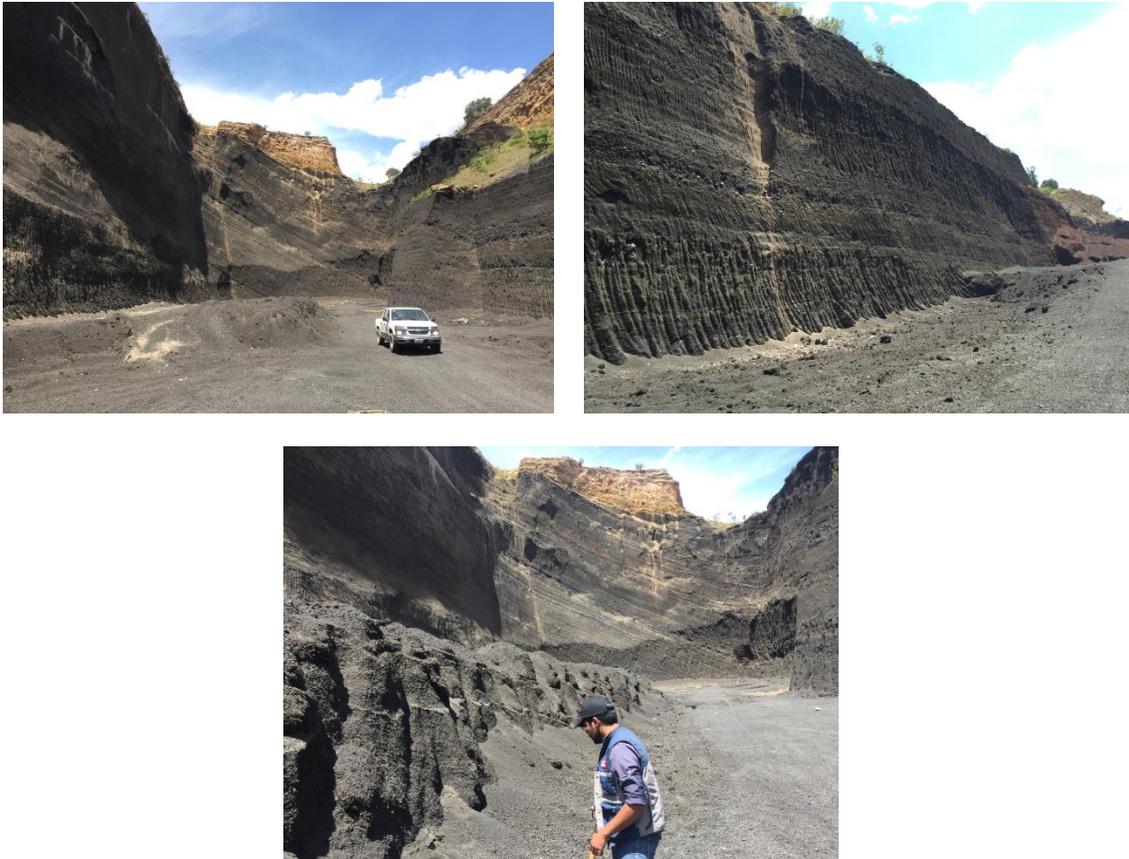


Figura 2.7. Muestreo en Cerro Grande

Por otra parte, el sitio denominado Tepexpan sí se encuentra en explotación constante a gran escala. En dicho punto cuentan con grandes tamices capaces de separar todo el **material en función de las mallas de 2", 3/4", 3/8" y No. 4** (Ver Figura 2.8).

La separación por tamaños, previamente mencionada, permite realizar un muestreo más selectivo y enfocarlo en los materiales que realmente se necesitan en mayor cantidad **para las pruebas triaxiales, como lo es el material que pasa la malla 3/8" y la No. 4.**

De este tercer tipo de escoria volcánica se muestreó un total de 120 kg aproximadamente.

Todo el material muestreado de los tres diferentes puntos fue transportado y acopiado en el Laboratorio de Vías Terrestres del IIUNAM, para su posterior clasificación y separación por tamaños.

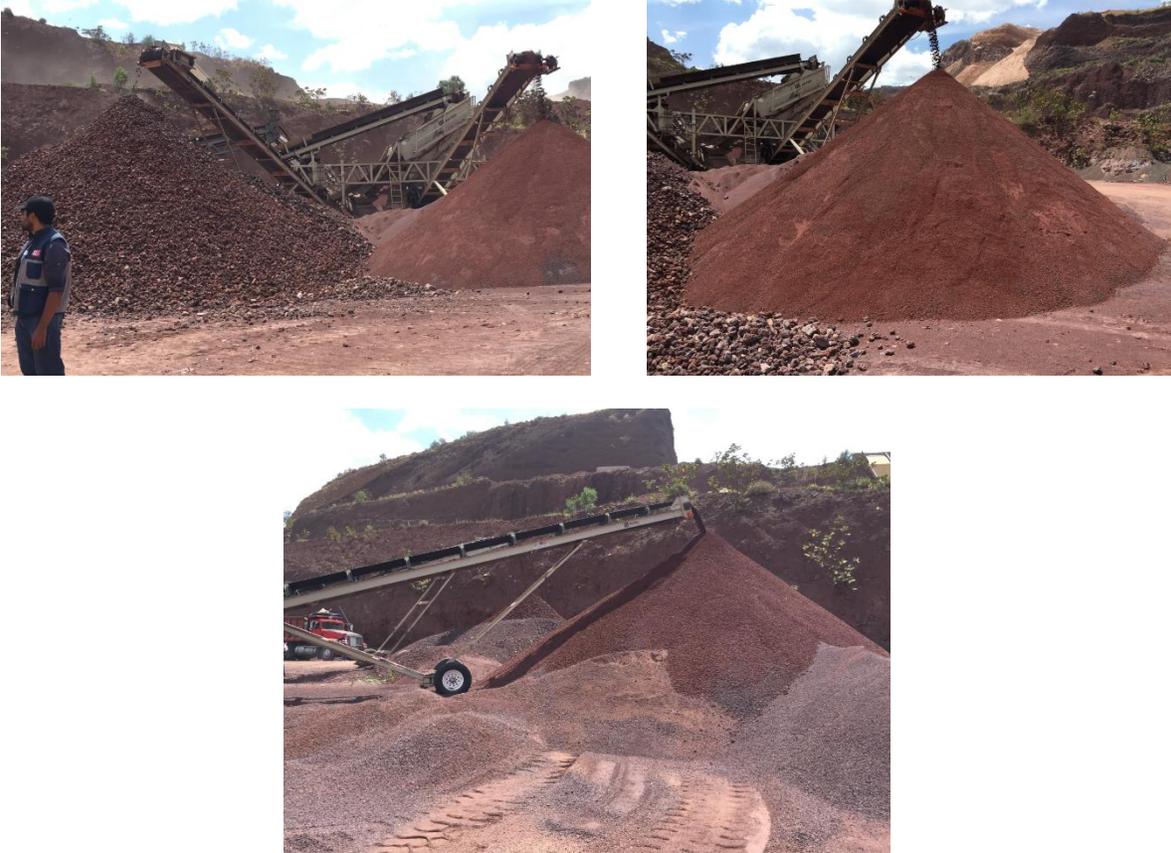


Figura 2.8. Muestreo en Cerro Tepexpan (separación por tamaños)

2.2 Granulometría a utilizar en este estudio.

Para las distintas obras de ingeniería que se desarrollan en la construcción de los tramos de prueba en el NAICM, tales como plataformas, caminos de acceso, terraplenes entre otras, se usó escoria volcánica proveniente de los dos bancos previamente mencionados. Al determinar la curva granulométrica del material que estaba siendo instalado en dichas obras se pudo constatar que ésta correspondía a una curva de sub-base, según la normativa de la Secretaría de Caminos y Transporte (SCT). Es importante mencionar que a este material no se le estaba realizando tratamiento alguno previo de separación por tamaños en el banco, por lo que se pudo concluir que la granulometría del material en greña era, precisamente, la de una sub-base. Lo anterior se pudo ratificar al hacer un muestro y estudio granulométrico del material tal y como era explotado en el banco.

Con base en lo anterior, para esta investigación se decidió usar una granulometría correspondiente a una sub-base, asumiendo que dicho material podría ser usado en el cuerpo de un terraplén estructural.

En la Tabla 2.1 se muestran los requisitos granulométricos, según la normativa de la SCT (N-CTM-4-02-001/11) que debe cumplir un material para poder usarse como sub base en la estructura de un pavimento asfáltico.

Tabla 2.1. Requisitos granulométricos de materiales para sub bases de pavimentos asfálticos (N-CTM-4-02-001/11)

Malla		Porcentaje que pasa ⁽¹⁾	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ ⁽²⁾	$\Sigma L > 10^6$ ⁽²⁾
75	3"	100	100
50	2"	85-100	85-100
37.5	1 (1/2) "	75-100	75-100
25	1"	62-100	62-100
19	3/4"	54-100	54-100
9.5	3/8"	40-100	40-100
4.75	No. 4	30-100	30-80
2	No. 10	21-100	21-60
0.85	No. 20	13-92	13-45
0.425	No. 40	8-75	8-33
0.25	No. 60	5-60	5-26
0.15	No. 100	3-45	3-20
0.075	No. 200	0-25	0-15

(1) El tamaño máximo de las partículas no será mayor de 20% del espesor de la subbase.

(2) ΣL = El número de ejes equivalentes acumulados de 8.2 t, esperado durante la vida útil.

La tabla anterior muestra dos grandes rangos definidos en función del número de ejes equivalentes acumulados esperados en la vida útil de la estructura del pavimento (Ver Figura 2.9). Considerando la importancia y magnitud de cargas que soportará la estructura del pavimento del terraplén, se definió que se trabajaría con la curva que represente las condiciones más exigentes o lo que es igual, en la que se supone un valor de más de 10 millones de ejes equivalentes.

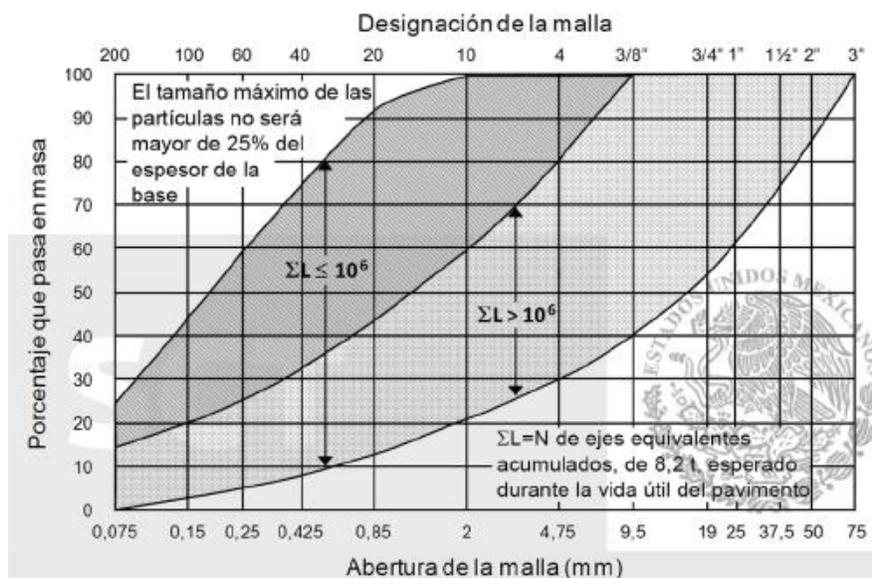


Figura 2.9. Zonas granulométricas recomendables de los materiales para sub-base (N-CTM-4-02-001/11)

Con base en estas zonas recomendadas, se definió la curva granulométrica con la que se realizarán las diferentes pruebas de esta investigación (Ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Granulometría de la curva propuesta para estudio

Malla No.	Abertura mm	Peso suelo retenido g	Porcentaje retenido %	Porcentaje que pasa %	Malla No.	Abertura mm	Peso suelo retenido g	Porcentaje retenido %	Porcentaje que pasa %
2"	50.00				10	2.00	1,300.00	16.88	46.75
1 1/2"	37.50				20	0.85	1,100.00	14.29	32.47
1"	25.00				40	0.43	650.00	8.44	24.03
3/4"	19.00	0.00	0.0	100.00	60	0.25	400.00	5.19	18.83
3/8"	9.50	1400.00	18.2	81.82	100	0.150	400.00	5.19	13.64
No. 4	4.75	1400.00	18.2	63.64	200	0.075	450.00	5.84	7.79
Pasa No. 4		4900.00	63.6		Pasa 200		600.00	7.79	0.00
					Peso total de la muestra		7,700.00	100.00	

Cu	Cc	%G	%A	%F
40	1.23	36.4	55.8	7.78

Este material se clasifica, según el SUCS, como:

SW: Arena bien graduada con limo y grava

La curva se definió para una muestra cuyo peso ronda los 7,700 g ya que según pruebas realizadas previamente, con este mismo material y en el mismo equipo triaxial, esa es la cantidad requerida para poder formar la probeta de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. Esta curva definida se encuentra dentro del rango que indica la normativa anteriormente descrita (Ver Figura 2.10).

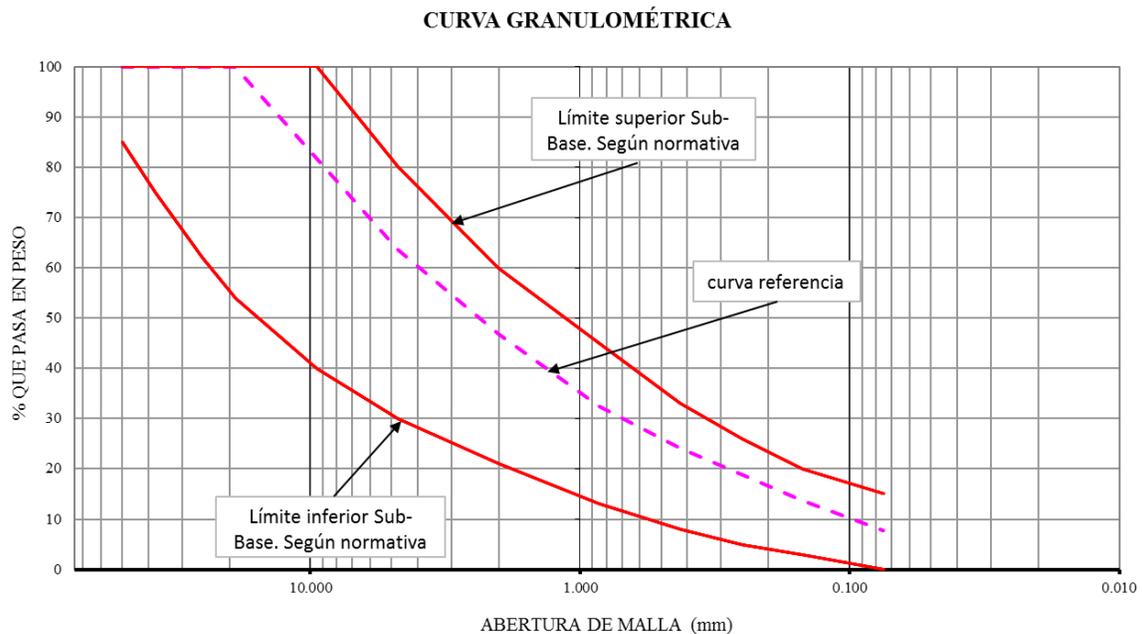


Figura 2.10. Curva granulométrica definida para la investigación

Luego de contar con el material y habiendo definido la curva granulométrica que se requiere reproducir para realizar las pruebas, fue necesario cribar la escoria volcánica para así clasificarla por tamaños. Debido a la cantidad de material que debe ser separado, dicha labor se realizó en una cribadora de gran tamaño existente en el Laboratorio de Vías Terrestres de Instituto de Ingeniería UNAM; también fue necesario rehabilitar otra cribadora de grandes dimensiones ubicada en el Laboratorio de Enrocamientos, misma que fue usada por el profesor Marsal en sus investigaciones en la década del 70. Para cribados donde se requería precisión se recurrió a los tamices tradicionales (Ver Figura 2.11, Figura 2.12 y Figura 2.13).

El material proveniente de Xaltepec fue muestreado durante los meses secos del año, por lo que al determinar su humedad natural ésta resultó ser menor a 1%. Lo anterior evitó que fuera necesario secar el material para poder cribarse. Por otro lado, los materiales muestreados del Cerro Totolcingo, sí tenían cierta humedad, por lo que para cribarlos fue necesario un proceso de secado previo.

El cribado y clasificación por tamaños se realizó tantas veces como fue necesario, con el objetivo de contar con la cantidad suficiente de material para poder realizar tanto las pruebas de compactación como las triaxiales, sin reusar material.

No sobra destacar que dicha labor de cribado llega a tornarse muy tediosa y requerir mucho tiempo para poder llevarse a cabo, aún más debido a que algunos de los materiales muestreados no contaban con la cantidad suficiente de algunos de los tamaños requeridos para poder formar la curva ya definida, razón por la cual fue necesario realizar un proceso de trituración en algún momento.



Figura 2.11. Cribadora de grandes dimensiones del Laboratorio de Vías Terrestres



Figura 2.12. Cribadora de gran tamaño habilitada para este trabajo

Una vez separado por tamaños la totalidad de los materiales seleccionados para esta investigación, se almacenó en baldes de 20 litros, como se aprecia en la Figura 2.13.



Figura 2.13. Tamices tradicionales y almacenaje del material

3. PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS

3.1 Descripción del programa de ensayos de laboratorio.

Para determinar las propiedades mecánicas de la escoria volcánica compactada se desarrolló el plan de trabajo y las pruebas de laboratorio que se indican a continuación.

Inicialmente, para la caracterización de cada uno de los tres materiales, se plantearon las siguientes pruebas de laboratorio:

- ✓ Límites de plasticidad.
- ✓ Equivalente de arena.
- ✓ Densidad de sólidos.
- ✓ Porcentaje de desgaste (resistencia a la trituración), mediante la prueba en la máquina de los Ángeles.

Las pruebas recién mencionadas se detallan en los apartados siguientes de este capítulo.

Una vez caracterizado el material se procede a realizar las pruebas mecánicas para determinar sus propiedades de resistencia, en esta investigación se determinan mediante pruebas triaxiales.

En la mayoría de cámaras triaxiales tradicionales no es posible ensayar este tipo de material debido a los tamaños de granos con los que se trabaja. Para poder llevar a cabo estas pruebas, el Instituto de Ingeniería de la UNAM cuenta en su Laboratorio de Mecánica de Suelos, con una máquina (MTS) que permite realizar pruebas triaxiales cíclicas y estáticas a materiales cuyo tamaño máximo de partículas alcanza **los 3/4"**.

Las pruebas triaxiales que acá se proponen se realizan a probetas de material compactado, las cuales han alcanzado determinados valores de compacidad relativa. Debido a ello, es necesario realizar previamente pruebas de compactación a cada uno de los materiales para determinar el valor correspondiente al 100% de su compacidad. Para esto hace falta conocer la relación de vacíos máxima y mínima (e_{max} y e_{min}) de cada tipo de tezontle o los pesos volumétricos máximos y mínimos que éstos pueden alcanzar. Lo anterior se logra mediante las pruebas de compactación, mismas que se describen más adelante en este capítulo.

Una vez que se conocen los valores de compacidad máxima y mínima de cada material, es posible determinar los valores de pesos volumétricos que representan un determinado porcentaje de la máxima alcanzada.

Los objetivos de esta investigación se alcanzan al realizar pruebas triaxiales estáticas a un tipo de escoria volcánica usando tres compacidades relativas diferentes, bajo una misma condición de humedad; adicionalmente, se han de realizar, a los otros dos tipos de escoria, pruebas triaxiales bajo un mismo valor de compacidad relativa (75%), siempre usando la misma humedad. De esta forma es posible conocer el comportamiento esfuerzo-deformación y las propiedades de resistencia de un material en función de su compacidad relativa y la forma en que varía dicho comportamiento, bajo una misma compacidad, para cada material estudiado.

Para determinar el ángulo de fricción interno de un material, bajo una determinada compacidad relativa, es necesario realizar una serie de pruebas triaxiales en la cual se manejan tres esfuerzos de confinamiento diferentes. Durante todo el proceso, tanto de **aplicación del esfuerzo confinante (σ_3) como del esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$)**, se mantuvieron condiciones drenadas, por lo que los resultados obtenidos corresponden a parámetros en términos de esfuerzos efectivos. A ello se le agrega la alta permeabilidad de estos materiales, lo que asegura, en efecto, las condiciones drenadas.

Los detalles de la cámara triaxial usada, el procedimiento para formar la probeta, así como el número de pruebas realizadas se detallan más adelante.

Como información adicional a las propiedades de resistencia, en esta investigación se planteó realizar algunas pruebas de permeabilidad (de carga constante) a dos tipos de escoria volcánica (Xaltepec y Cerro Grande), lo anterior con el objetivo de conocer el valor de esta propiedad, la cual es muy importante si se quiere usar este material en algún tipo de estructura que requiera drenaje. Debe señalarse que la intención de estas pruebas no es ser exhaustivos en ensayar materiales de diversos bancos, sino más bien, sólo sentar las bases para que en estudios posteriores se lleven a cabo, de manera más completa, todas estas pruebas en materiales provenientes de diferentes sitios. Con el fin de no limitar significativamente los tamaños máximos de los granos de las muestras por ensayar, se decidió implementar un permeámetro de grandes dimensiones. **Dicho permeámetro tiene 57 cm (22") de diámetro y 90 cm (35") de altura. Al material usado para estas pruebas no se les hizo ningún tratamiento de cribado previo.** La forma en que éste se elaboró, así como otros de sus detalles se mencionan más adelante en este capítulo.

A continuación se menciona la forma en que se desarrollan cada una de las pruebas propuestas para la caracterización del material.

3.2 Pruebas para caracterizar el material

3.2.1 Límites de plasticidad

Límite líquido

Por la naturaleza del material y debido a la poca o nula plasticidad que éste presenta, el intentar obtener un valor de límite líquido mediante el procedimiento tradicional de la copa de Casagrande es una labor que no arrojó resultados coherentes. No obstante, para determinar algún valor de referencia de este parámetro en los tres tipos de escoria, dicha prueba se realizó usando el método del Cono Sueco.

La determinación del límite líquido con este método es una técnica alterna al método de percusión con la copa de Casagrande; el aquí llevado a cabo es un proceso de indentación de un cono que cae por su propio peso desde una posición en reposo en la que su punta toca la superficie enrasada del material. Luego de varias investigaciones realizadas con este método, se ha llegado a la conclusión que este procedimiento es una forma más simple de obtener el valor de límite líquido y que se ve menos influenciada por la capacidad y perspicacia del operador, de hecho, su uso en países como Suecia y Noruega ha reemplazado por completo el tradicional, que usa la copa de Casagrande. A pesar de

lo anterior, el método tradicional es el más usado y reconocido a nivel mundial. Por tal razón, se han llevado a cabo diferentes investigaciones que relacionan los resultados obtenidos con ambos métodos (Mendoza, 1992).

Para esta prueba se debe llenar un molde con el material, contando éste con cierta humedad, misma que se va variando, agregando agua, hasta que se cuenten con varios valores de indentación del cono de 60 g y 60° por encima y por debajo de los 10 mm, ver Figura 3.1 y Figura 3.2.

En esta investigación se presentan los resultados obtenidos con el cono Sueco, y a dicho valor se le aplica una correlación, con la cual podría estimarse el valor del límite con el procedimiento tradicional.



Figura 3.1. Límite líquido mediante Cono Sueco

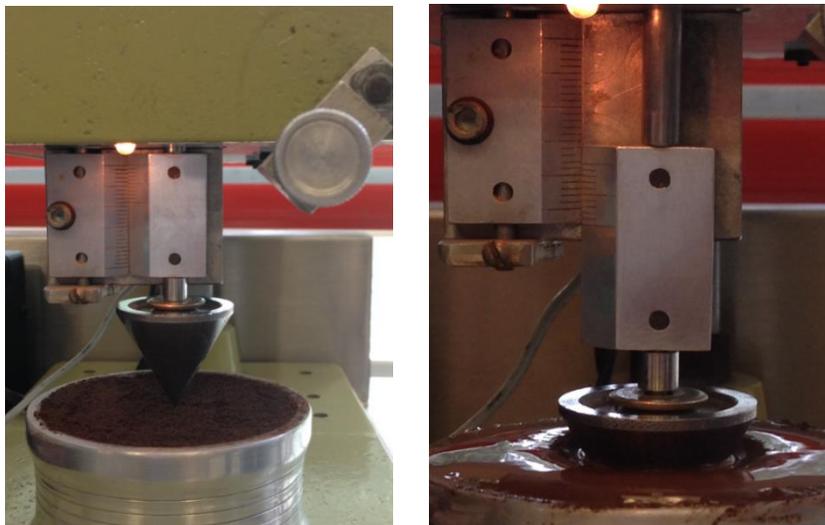


Figura 3.2. Prueba en desarrollo de dos humedades distintas

3.2.2 Equivalente de arena

Esta prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos presentes en la escoria volcánica. La prueba consiste en agitar un cilindro que contiene una muestra de material que pasa la malla No. 4 (el material usado se ha dosificado en función de la curva granulométrica definida previamente) mezclada con una solución que permite separar la arena de la parte más fina (Ver Figura 3.3).

Se hicieron dos pruebas por cada material, lo anterior para verificar la repetitividad y consistencia de los resultados, mismos que se presentan en el capítulo de resultados. En este trabajo no se explica a detalle el procedimiento de las prueba, no obstante todo el desarrollo se hizo bajo la normativa N.MMP.4.04.004/02 de la SCT.



Figura 3.3. Prueba en desarrollo, equivalente de arena

3.2.3 Densidad de sólidos

La densidad de sólidos se realiza al material dosificado en función de la granulometría definida para estas pruebas, usando material que pasa el tamiz No. 4 hasta material fino. Se llevan a cabo con el fin de conocer la masa de la parte sólida, sin vacío, por unidad de volumen de dichos sólidos en cada una de sus tres fracciones, ya sea para arenas, finos o gravas, respecto a la densidad del agua.

Para las arenas, consiste en eliminar el aire atrapado en la muestra sumergiéndola en agua destilada en ebullición. Esta prueba se desarrolla según la normativa vigente N.MMP.4.04.003/02 de la SCT, ver Figura 3.4.

Se establece la ejecución de dos pruebas por cada materia y se trabaja bajo la premisa de que los dos resultados no deben tener una diferencia de más de 2%.



Figura 3.4. Determinación de densidad de sólidos, prueba en desarrollo

3.2.4 Desgaste en la prueba de Los Ángeles

Esta prueba se usa para determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos. Para desarrollar esta prueba se requiere colocar una muestra de material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio (ver Figura 3.5 y Figura 3.6), en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un lapso determinado. Se requiere obtener la variación granulométrica de la muestra determinando el peso del material retenido en el tamiz No.12, antes y después de haber sido sometida la muestra a los giros e impactos.

Para esta investigación se realizaron dos pruebas de este tipo a cada material, todas basándose en la normativa N-MMP-4-04-006/02 de la SCT. Las pruebas aquí desarrolladas son de tipo A, ya que son las que presentan una mayor carga abrasiva.



Figura 3.5. Material clasificado por tamaños según normativa



Figura 3.6. Material luego de la prueba

3.2.5 Permeabilidad

Las pruebas de permeabilidad se realizaron a dos de los tres materiales muestreados, Xaltepec y Cerro Grande. Cabe mencionar que la intención de estas pruebas en particular es sentar las bases para que en estudios posteriores se profundice en la investigación de esta propiedad en los tezontles.

Para estas pruebas se usó el material tal y como se muestreó en los bancos, sin tratamiento alguno de cribado previo y sin querer representar alguna curva granulométrica. La única labor de separación de tamaños que se realizó fue en el material proveniente de Xaltepec, ya que debido a los sobre tamaños que existían, fue necesario retirar todos aquellos **granos cuyo tamaño fuera mayor a 1½"**, como se

observa en la Figura 3.7. Lo anterior no fue necesario de hacer en el material de Cerro Grande ya que éste es muy homogéneo en cuanto a su tamaño máximo y no presenta partículas muy grandes.



Figura 3.7. Retiro de tamaños mayores a 1½"

En las Figuras 3.8 y Figura 3.9, se muestran las curvas granulométricas de los dos diferentes materiales usados en las pruebas de permeabilidad. Para tener una referencia, se muestra también el rango dentro del cual, según la normativa de la SCT (N-CTM-4-02-001/11), una curva se considera que podría ser usada como sub-base.

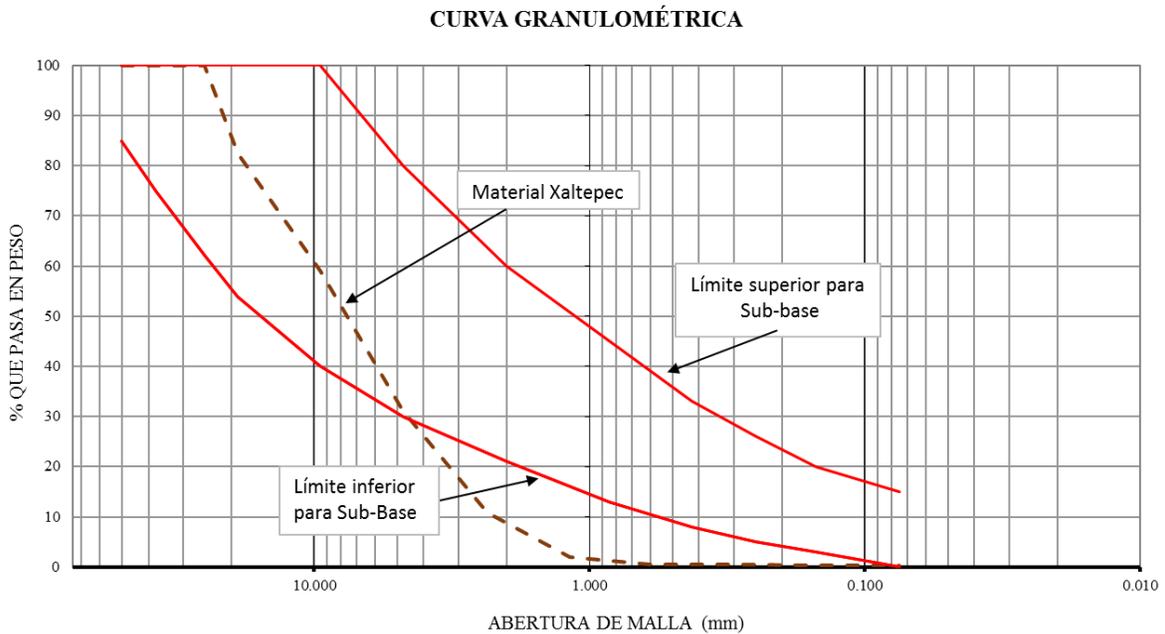


Figura 3.8. Granulometría de material a ensayar en pruebas de permeabilidad, Xaltepec

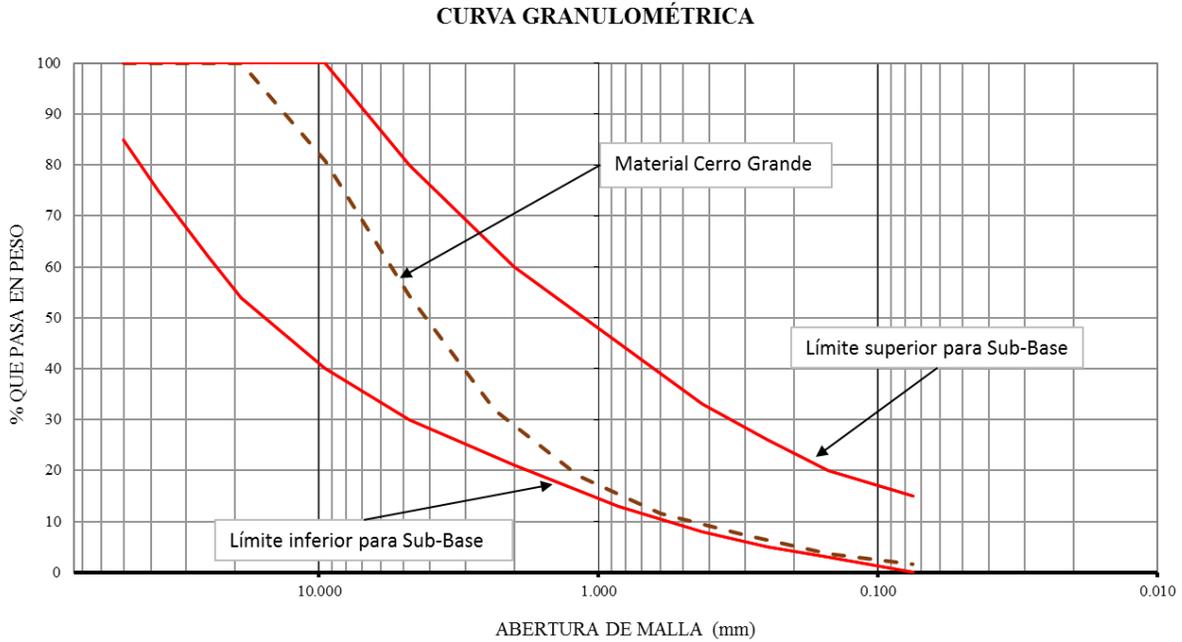


Figura 3.9. Granulometría de material a ensayar en pruebas de permeabilidad, Cerro Grande

De las anteriores curvas granulométricas es posible determinar los porcentajes de gravas, arenas y finos, así como los coeficientes de uniformidad y de curvatura para poder clasificar los materiales según el SUCS. Ver Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros que definen la granulometría de los materiales ensayados

	Xaltepec	Cerro Grande
%G	68.8	45.6
%A	30.9	52.8
%F	0.30	1.62
Cu	4.8	9
Cc	1.10	2.15

Según el SUCS, estos dos tipos de suelo se clasifican como:

Xaltepec
GW Grava bien gradada con arenas

Cerro Grande
SW Arena bien gradada con gravas

3.2.5.1 Sistema desarrollado para realizar las pruebas

El sistema desarrollado para realizar estas pruebas de permeabilidad se compone de:

- Tanque para suministro de agua: se hace uso de un tinaco con capacidad de 1100 lts, se usó para mantener en el sistema una carga constante, ubicándolo sobre un andamio.
- Sistema de suministro: en la parte inferior de este tanque se habilitó un sistema de suministro conformado por una válvula y tubería de PVC. Dicho sistema permite que el caudal entregado por el tanque se reparta en cuatro mangueras independientes, cada una con un diámetro de 1" (Ver Figura 3.10).

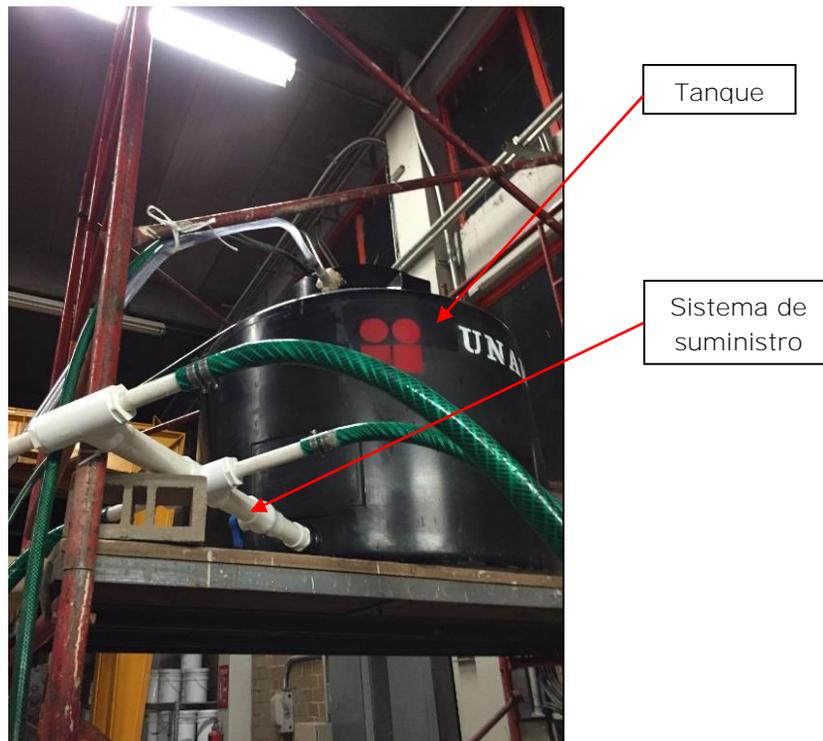


Figura 3.10. Sistema de suministro y tanque para pruebas de permeabilidad

- Mangueras: se usaron varias mangueras con diámetro de 1 pulgada con sus debidos conectores, se trató de usar el menor número posible de reducciones y conexiones para mantener las pérdidas de energía, debido a dichos accesorio, lo más bajas posibles.
- Permeámetro: se elaboró a partir de un tambo metálico con capacidad de 200 lts, dentro del que se ubicó el material a ensayar. El agua entra por la parte inferior, lo anterior hace que el material se sature de abajo hacia arriba. En la parte superior del permeámetro hay una perforación en la cual, con ayuda de tubería de PVC, se mide el gasto de salida del sistema.
- Sistema para reusar el agua: se usó un segundo tambo para almacenar el agua que desfogaba del sistema, adicionalmente, se usó para alimentar el tanque y

dar continuidad al flujo con la ayuda de una bomba hidráulica. Lo anterior permitió que la carga se mantuviera constante.

Un esquema general del sistema desarrollado para estas pruebas se observa en la Figura 3.11 y Figura 3.12.

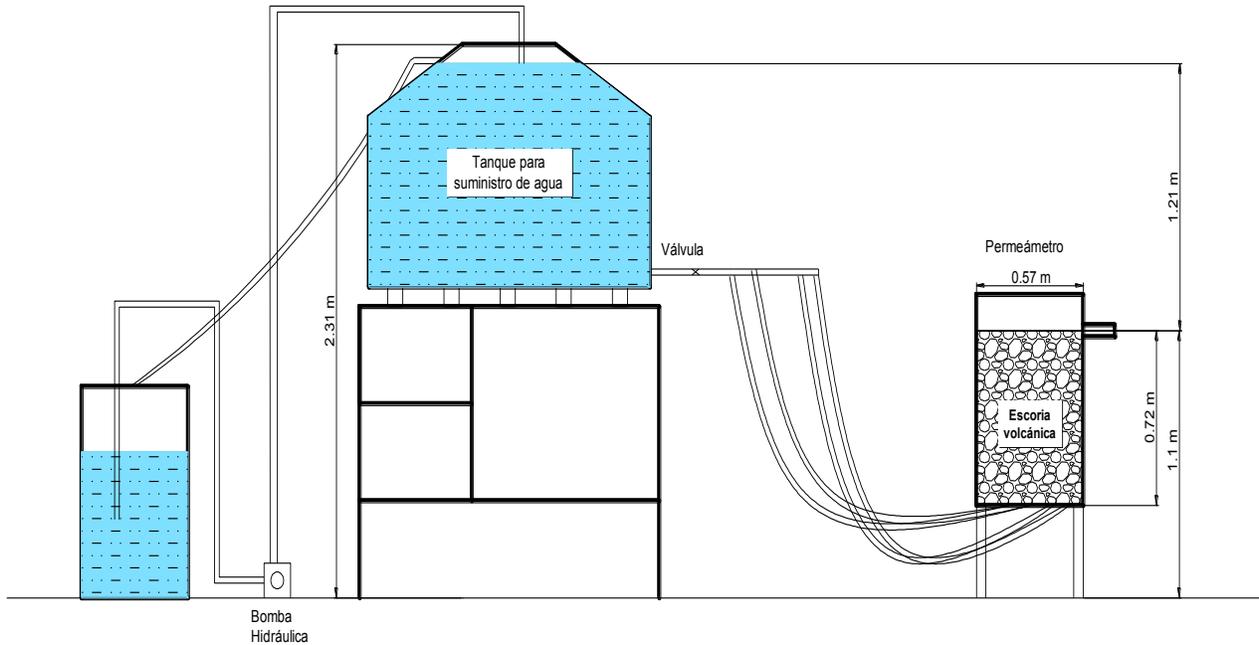


Figura 3.11. Esquema del sistema general para pruebas de permeabilidad



Figura 3.12. Sistema para pruebas de permeabilidad

Antes de llevar a cabo las pruebas de permeabilidad, se realizan algunas mediciones en el sistema para determinar el orden de magnitud de permeabilidad que es posible llegar

a medir. Para esto fue necesario conocer el gradiente hidráulico del sistema; éste se determina con la diferencia de alturas existente entre el nivel constante del agua en el tanque de suministro y el nivel de salida del agua en el permeámetro, así como con la longitud de la muestra de material dentro del permeámetro. Con base en el gradiente y en el área transversal del permeámetro, la permeabilidad del sistema se obtiene midiendo el volumen de agua que fluye a por éste en un determinado tiempo. Para lo anterior se hace uso de la ley de Darcy.

$$k = \frac{Q}{iA}$$

Donde:

- k : Permeabilidad, cm/s.
- Q : Caudal del sistema, cm³/s.
- A : Área transversal de la muestra ensayada, cm².
- i : Gradiente hidráulico del sistema.

Luego de conocer el orden de magnitud de la permeabilidad que es posible medir, se dispone a colocar el material dentro del permeámetro por volteo, sin llevar a cabo ningún proceso de compactación.

Una vez que se ha instalado el material (ver Figura 3.13) se procede a saturarlo abriendo las válvulas y permitiendo que el agua fluya, llegando al permeámetro por la parte inferior y saturando todo el material. Se permite que el nivel del agua sobrepase un poco el del material a ensayar, generando un pequeño espejo de agua, seguidamente se deja por 24 horas este nivel, sólo hasta entonces se considera que se ha saturado por completo. En la Figura 3.14 es posible apreciar los materiales saturándose. Una vez saturado, se procede al desarrollo de las pruebas.

Durante las pruebas, se abren las válvulas permitiendo al agua circular por el sistema y a través de la muestra que se desea ensayar. Seguidamente, tomando el tiempo en que se llenan ciertos recipientes de un volumen definido, se determina el caudal que pasó por el material (ver Figura 3.15). Finalmente, medido el caudal y conociendo el área transversal del permeámetro, es posible definir la permeabilidad del material. Se realizaron varias pruebas por cada material para verificar la repetitividad de los resultados.



Figura 3.13. Material dentro del permeámetro



Figura 3.14. Saturación del material



Figura 3.15. Pruebas en desarrollo

3.2.6 Determinación de la compacidad relativa (D_r)

Para determinar el valor de la compacidad máxima de cada uno de los tres materiales estudiados es necesario conocer los valores de pesos volumétricos máximos y mínimos que éstos pueden alcanzar.

La SCT cuenta con una normativa que rige la determinación de los pesos volumétricos secos sueltos en suelos y materiales para terracerías (M-MMP-1-08/03); debido a algunos requerimientos de esta investigación, y con base en la normativa ya mencionada, se definió el siguiente procedimiento para determinar el peso volumétrico mínimo, estado más suelto de cada material.

- Se cuenta con el material dosificado según la curva granulométrica definida previamente. (Ver Figura 3.16).

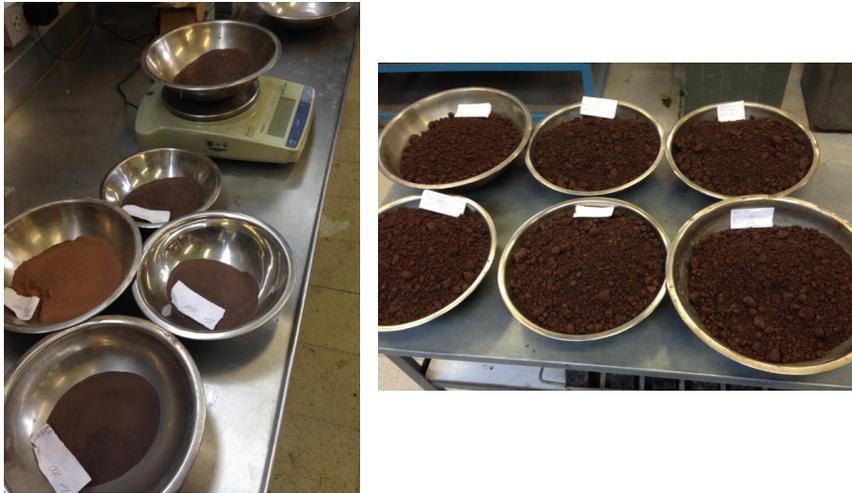


Figura 3.16. Dosificación del material

- Una vez que se cuenta con dicho material, se homogeniza todo en una charola (Ver Figura 3.17).



Figura 3.17. Homogenización del material

- Para llevar a cabo las pruebas de compactación se hace uso de un molde cuyas dimensiones son 15 cm de diámetro por 11 cm de alto (Ver Figura 3.18).



Figura 3.18. Molde usado para determinar pesos volumétricos

- Dentro de este molde, con la ayuda de un embudo, se vacía el material asegurando que la caída de éste no sea superior a 2 cm. El embudo, al iniciar la prueba, se ubica en el fondo del molde y se va subiendo a medida que se va llenando con el material.
- Una vez lleno el molde, se enraza y se determina su peso lleno. Con el dato anterior, y conociendo el volumen del molde y su peso vacío, es posible determinar el peso volumétrico suelto de la escoria volcánica, compacidad mínima (Ver Figura 3.19). En todos los casos se realizaron dos y en ocasiones tres pruebas para verificar la repetitividad de los resultados obtenidos.



Figura 3.19. Molde con material enrazado

Para conocer el peso volumétrico máximo (compacidad máxima) es necesario hacer varias pruebas de compactación variando, en cada una de ellas, el tiempo de compactación en las capas del material.

Se realizaron algunas pruebas densificando el material mediante impactos, lo anterior generó un gran rompimiento de partículas; para evitar esto, en esta investigación el material se compacta por medio de vibración, ya que es la forma idónea de densificar un material granular.

En este estudio se usa un vibrador marca Brecon cuya frecuencia de vibración es de 60 Hz. Dicho vibrador tiene una masa de 8.5 kg, consta de un pequeño cilindro vibratorio al cual se le adosa una extensión de 30 cm y una placa circular de 15 cm de diámetro (Ver Figura 3.20). Para compactar cada una de las diferentes capas con las que se llena el molde, se dispone el vibrador sobre el material, posteriormente, se acciona por diferentes lapsos, los cuales se mencionan más adelante, al finalizar el tiempo estipulado para la compactación se apaga el vibrador y se retira del molde sin golpear las paredes del mismo, con el objetivo de no transferir mayor compactación de la deseada.

Los tiempos estipulados de compactación para cada capa son: 0, 10, 30, 60, 120 y 240 s. Si el peso volumétrico no cambia al aumentar al doble el tiempo de vibrado, es posible afirmar que dicho valor corresponde al máximo peso volumétrico que puede alcanzar el material sin romperse.

El procedimiento usado se describe a continuación:

- Se dosifica el material según la curva granulométrica en estudio.
- Se homogeniza el material en una charola. Si se requiere que el material tenga cierta humedad, se le agrega la cantidad necesaria de agua destilada.
- El material se ubica dentro del molde por capas de 1 pulgada de espesor cada una. El vaciado del material dentro del molde se hace como ya se explicó anteriormente, con ayuda de un embudo para asegurar que la caída de las partículas no sea mayor a 2 cm.
- En la primera prueba, la capa inicial se compacta durante 10 s, luego se compacta la segunda por el mismo tiempo y así sucesivamente por el mismo lapso.
- Una vez que se han compactado las capas y el molde está lleno, se procede a enrazar y determinar su peso, determinando así su peso volumétrico.
- La segunda prueba se lleva a cabo compactando el material en capas durante 30 s cada una, luego de determinar el peso volumétrico del material con este tiempo, se procede a realizar más pruebas, ahora compactando las capas por 60, 120 y 240 s.



Figura 3.20. Vibrador usado y material compactado en el molde

Se determinó un valor de 12% como la humedad con la que se realizan las diferentes pruebas de compactación, lo anterior debido a que dicha humedad es la que fue reportada por parte del laboratorio de control de calidad de material, en la construcción del terraplén de prueba en el NAICM.

Luego de cada una de las pruebas de compactación se realiza un análisis para conocer el rompimiento de las partículas y determinar el cambio en la granulometría debido a este proceso de densificación.

3.3 Pruebas triaxiales.

El equipo triaxial MTS que se usa en esta investigación se encuentra en el Laboratorio de Mecánica de suelos del IIUNAM, este equipo permite llevar a cabo pruebas triaxiales estáticas (carga monotónica) y dinámicas (señales periódicas o aperiódicas), a carga o desplazamiento controlado. Consta de tres elementos (Flores, 2008).

- Sistema hidráulico con presión de aceite. Dicho sistema consta de una bomba que suministra aceite a dos acumuladores, los cuales accionan el pistón hidráulico que se ubica sobre la camisa de la cámara triaxial aplicando así las cargas sobre la probeta.
- Panel de control. En este panel se define si el equipo trabaja a carga o deformación controlada, así como los porcentajes de trabajo en función del límite máximo del sensor que se haya instalado. Mediante una perilla es posible mover el pistón para colocar en posición el cabezal superior de la probeta. Todos estos cambios se hacen manualmente y antes de instalar la probeta en la cámara (ver Figura 3.21).



Figura 3.21. Panel de control (Flores, 2008)

- Sistema automatizado del equipo, captura y procesamiento de datos. Este sistema consta del equipo triaxial, un computador con tarjeta de adquisición de datos instalada y un conjunto de sensores. Lo anterior permite diseñar y ejecutar cuatro diferentes tipos de pruebas: Pruebas estáticas con un patrón de aplicación de carga o desplazamiento; pruebas dinámicas senoidales mediante un patrón el cual varía la amplitud de la señal y número de ciclos de aplicación de carga; pruebas con patrón dinámico arbitrario combinando los patrones de carga o desplazamiento y definiendo la frecuencia, número de ciclos y amplitud que se quieran; y pruebas con desplazagrama las cuales permite leer un acelerograma de un sismo y aplicar en la prueba triaxial las características de una de las direcciones registradas.

En este equipo triaxial es posible instalar varios sensores de desplazamiento, los cuales sirven para controlar el equipo cuando se trabaja a desplazamiento controlado o cuando en pruebas dinámicas, se requieren aplicar amplitudes pequeñas. Otros sensores que se han usado en este equipo son: una celda de carga sumergible en la base de la cámara y una celda de presión diferencial para registrar cambios volumétricos en caso de pruebas drenadas; dentro de la cámara es posible contar con sensores de desplazamientos tanto axiales como radiales. (Flores, 2008).

Las probetas de material granular a ensayar en la cámara triaxial no se pueden elaborar o compactar en la máquina MTS debido a que el espacio disponible no lo permite. Por tal razón, esta máquina cuenta con una base removible de 15 cm de diámetro la cual permite que se compacte el material sobre ella y luego se lleve e instale en la cámara. Debido a esto, es necesario prestar especial atención para que en el momento de mover la probeta, el material no se disgregue, no se pierda la forma y se mantenga su compacidad.

Además de dicha base, para la elaboración de la probeta se hace uso de un molde partido de PVC de 30 cm de altura, dicha altura es con el objetivo de guardar una relación de esbeltez de 2: 1, lámina porosa y papel filtro para eliminar la migración de finos durante la prueba; para evitar que al momento de la compactación el material rompa la **membrana, se hace uso de papel "foamy"**. Durante la elaboración de la probeta se aplica vacío para que la membrana se pegue al molde y así toda el área este ocupada por el material. Lo anterior se aprecia en la Figura 3.22.



Figura 3.22. Molde para elaboración de probeta triaxial

El procedimiento para desarrollar estas pruebas es el siguiente:

- Se dosifica el material según la curva granulométrica definida previamente.
- Se mezcla en una charola agregándole la cantidad de agua destilada necesaria para alcanzar la humedad deseada (12%) (Ver Figura 3.23).
- **Se llena el molde con el material por capas de máximo 1"** de espesor cada una, de la misma forma en que se realizó para determinar los pesos volumétricos húmedos.
- Se procede a compactar cada una de estas capas el tiempo estipulado para alcanzar la compacidad relativa que se haya definido, seguidamente se enraza la probeta y pesa (Ver Figura 3.24).



Figura 3.23. Preparación del material

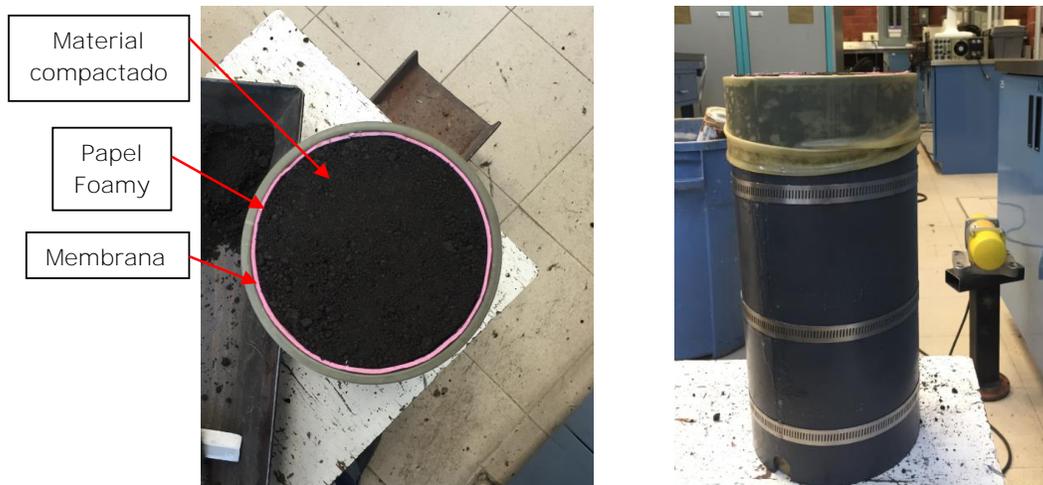


Figura 3.24. Enrazado de la probeta a ensayar

- Se ubica la probeta en la cámara triaxial, donde se retira el molde de PVC dejando la muestra expuesta (Ver Figura 3.25).



Figura 3.25. Instalación de la probeta en la cámara triaxial

- Seguidamente, se conecta el sistema de drenaje, el cual, como ya se mencionó, se mantiene abierto en todo momento (ver Fgiura 3.26).
- Se baja la camisa de la cámara y se aplica el esfuerzo de confinamiento (ver Fgiura 3.27).
- Una vez aplicado el confinamiento, se pone en marcha la prueba en función del vector de desplazamiento que se haya programado.

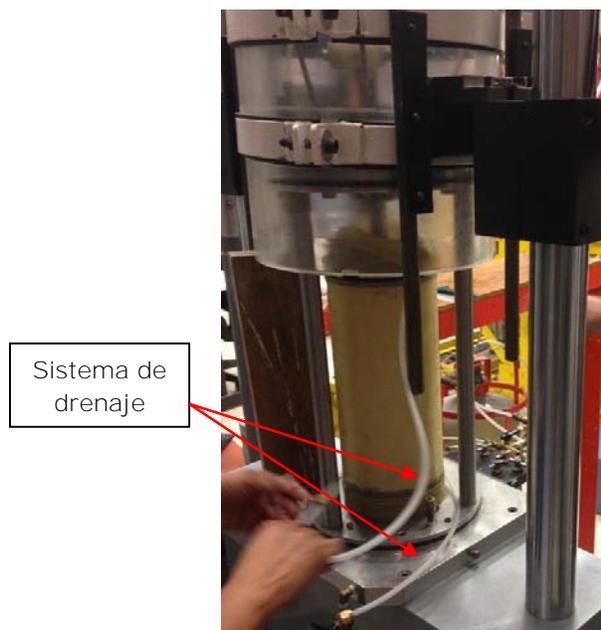


Figura 3.26. Montaje de la probeta



Figura 3.27. Camisa instalada y prueba lista para iniciar

Para esta investigación, en esta cámara triaxial se hace uso de un sensor de desplazamiento LVDT con una carrera de 60 mm, mismo que se ubica en la parte superior de la camisa, y una celda de carga cuya capacidad es de 2.5 toneladas (Ver Figura 3.28 y Figura 3.29). Estos instrumentos permiten registrar el comportamiento esfuerzo-deformación en cada una de las pruebas realizadas. Durante la aplicación del **esfuerzo confinante (σ_3)**, así como del **esfuerzo desviador, ($\sigma_1 - \sigma_3$)** el drenaje se mantiene abierto, por lo que los resultados obtenidos corresponden a parámetros en términos de esfuerzos efectivos.

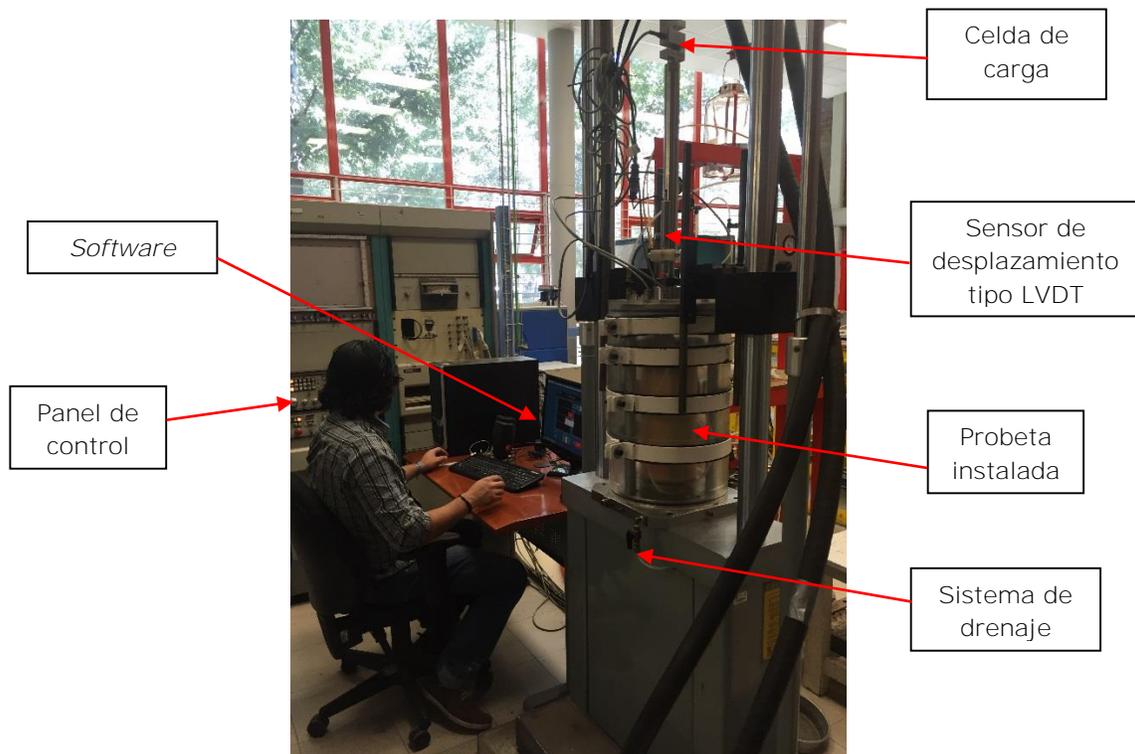


Figura 3.28. Equipo triaxial

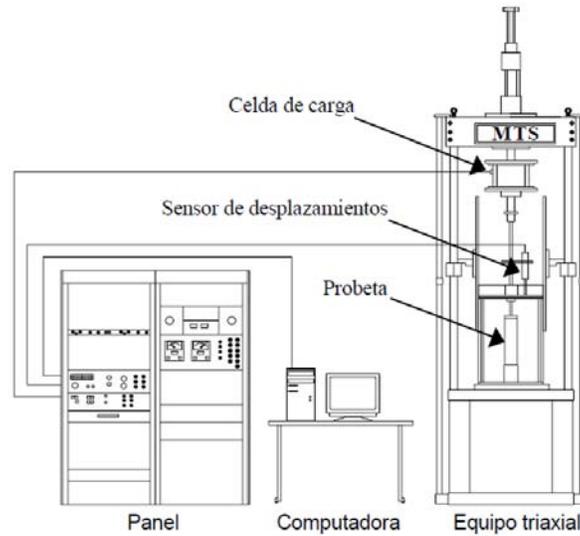


Figura 3.29. Esquema de Cámara Triaxial MTS (Flores, 2008)

La prueba triaxial inicia con la programación del vector de desplazamiento ya que es una prueba a deformación controlada, en donde se establece la deformación máxima a la que se quiere llegar, para este caso el 20% de la altura de la probeta (60 mm), y el tiempo requerido para llegar a dicha deformación (1.5 horas). Lo anterior se programa con la ayuda de un *software* que controla la totalidad de la prueba. En la Figura 3.30 se puede observar dicho vector.



Figura 3.30. Programación del vector de desplazamiento

Dicho *software* permite dar seguimiento a la prueba y ver en pantalla los registros que se van tomando tanto de desplazamiento como de carga y presión confinante, como se ve en la Figura 3.31.

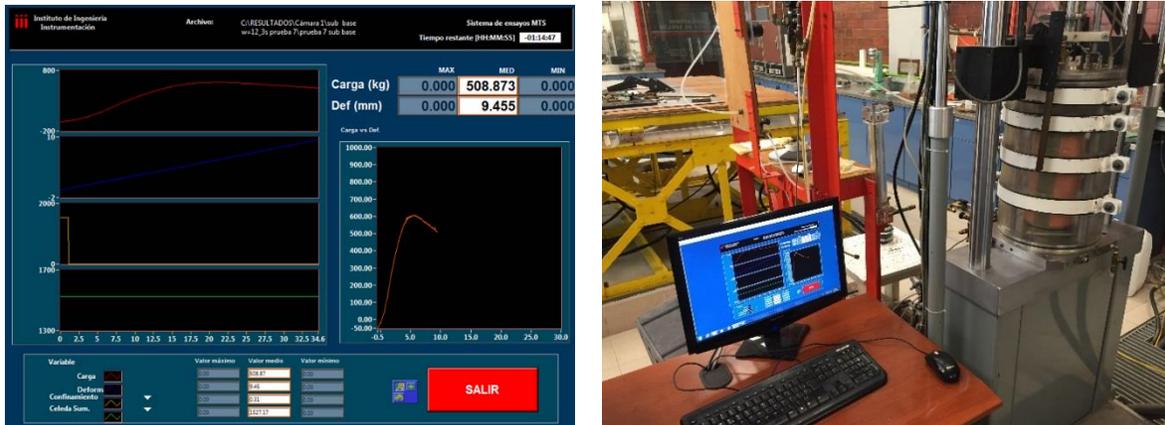


Figura 3.31. Prueba en desarrollo

Programa de pruebas

Al material proveniente de Xaltepec se le realizan 3 series de pruebas triaxiales estáticas, cada una de ellas con una compactación diferente (30, 75 y 95%). La verificación de que las probetas tienen las compactaciones deseadas se hace a través de los pesos volumétricos alcanzados por éstas, ya que, con base en los resultados de las pruebas de compactación, es posible afirmar que un determinado valor de compactación está directamente asociado con un peso volumétrico.

Con lo anterior es posible determinar la variación del ángulo de fricción de la escoria volcánica de Xaltepec en función de la compactación.

Para establecer si el ángulo de fricción varía en función del tipo de escoria volcánica, se realiza una serie de pruebas triaxiales a cada uno de los otros dos materiales (Cerro Grande y Tepexpan) usando un valor de compactación relativa usado en el material de Xaltepec. Para esto se han de compactar las probetas hasta alcanzar una compactación de 75% de las compactaciones máximas alcanzadas para cada uno de estos dos materiales.

Los confinamientos usados en cada serie de pruebas son (29.4, 58.8 y 117.1 kPa), por ende, son tres pruebas por cada serie. En todos los casos la humedad del material no debe ser muy diferente al 12%.

Al ensayar un material granular y llevarlo a la falla, es importante determinar el rompimiento que sufren los granos, por tal razón, adicional al análisis de rompimiento causado por la compactación en sí, realizado al momento de determinar los pesos volumétricos máximos y mínimos. Luego de la prueba triaxial se lleva a cabo otro análisis granulométrico para conocer el rompimiento durante esta prueba.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se muestran los principales resultados obtenidos, para cada uno de los tres materiales, en las pruebas antes mencionadas. De igual forma, al final de este capítulo se muestran las comparaciones y relaciones existentes entre ellos.

4.1 Resultados de las pruebas para caracterizar el material.

4.1.1 Límites de plasticidad

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos de la prueba de límite líquido mediante el método del Cono Sueco para la escoria volcánica procedente del banco de materiales Xaltepec, mismos que se ven graficados en la Figura 4.1.

Tabla 4.1. Resultados de penetración del Cono Sueco, Xaltepec

Penetración (mm)	Humedad (%)
4.5	23.3
6	25.4
9.6	27.4
11.9	28.7
14.8	28.8
18	30.8

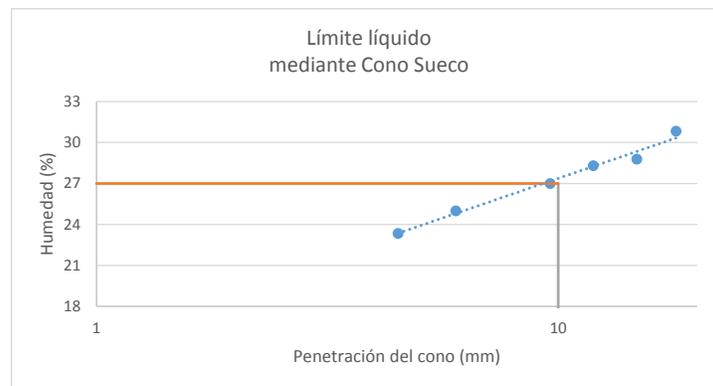


Figura 4.1. Determinación del límite líquido, Xaltepec

Para relacionar el valor obtenido de la prueba de Cono Sueco con el valor del límite líquido que se hubiera obtenido mediante la Copa de Casagrande, (Mendoza, 1998) propone la siguiente ecuación para suelos cuyo valor de límite líquido se encuentre por debajo de 40%.

$$W_{L\ copa} = 1.1949 * W_{L\ cono} - 9.27$$

W_L cono (%)	27
W_L copa (%)	23.0

Los resultados de penetración del cono y determinación de los valores de límite líquido para los materiales provenientes de Cerro Grande y Tepexpan, se muestran en el anexo 7.1.

En la Tabla 4.2 se muestran resumidos los resultados obtenidos para los tres tipos de escoria volcánica al usar el método del Cono Sueco y su correlación con el método tradicional de Casagrande.

Tabla 4.2. Resultados de límites líquidos

Límites líquidos (%)		
	Cono Sueco	Copa de Casagrande
Xaltepec	27	23
Cerro Grande	38	36.1
Tepexpan	29	25.4

Dos de los valores de límites líquidos obtenidos se encuentran dentro del rango indicado por la normativa para un material que se quiera usar como sub-base en una estructura de pavimento, el cual es de 25%, esto indica que estas escorias volcánicas sí pueden ser usadas para tal fin. Sin embargo, el material de Cerro Grande sobrepasa por mucho dicho valor.

4.1.2 Equivalente de arena

De este tipo de pruebas se llevaron a cabo dos para cada uno de los tres materiales estudiados, esto para verificar la repetitividad de los resultados, mismos que se muestran resumidos en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Resultados de equivalente de arena

PRUEBAS DE EQUIVALENTE ARENA	XALTEPEC		CERRO GRANDE		TEPEXPAN	
	Prueba		Prueba		Prueba	
	1	2	1	2	1	2
Lectura de arena (in)	3.98	4.65	3.85	3.85	3.6	3.9
Lectura de arcilla (in)	5.2	5.8	4.8	4.7	4.7	4.9
Equivalente arena (%)	76.54	80.17	80.21	81.91	76.60	79.59
Equivalente arena promedio (%)	78.36		81.06		78.09	

De lo anterior se tiene que el valor de equivalente arena para los tres materiales es similar, todos cercanos a un 80%. Las lecturas de arcilla en los tres materiales, al ser bajas, indican una fracción pequeña de material fino con baja plasticidad.

La normativa de la SCT que reglamenta el uso de un material como sub-base dentro de una estructura de pavimento, exige que el valor mínimo de este parámetro sea 40%. Por lo anterior, es posible concluir que estas escorias tendrían un comportamiento aceptable dentro de una sub-base ya que su cantidad y calidad de material fino así lo indica.

4.1.3 Densidad de sólidos

Detalles sobre la calibración de matraces y el desarrollo de estas pruebas se muestran en el anexo 7.2.

Los resultados obtenidos de densidad de sólidos para los tres materiales se resumen en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Resultados Densidad de Sólidos

Resumen pruebas de Densidad de Sólidos	XALTEPEC		CERRO GRANDE		TEPEXPAN	
	Prueba		Prueba		Prueba	
	1	2	1	2	1	2
Densidad de Sólidos	2.59	2.56	2.76	2.74	2.91	2.92
Valor promedio	2.58		2.75		2.92	

Se observa una diferencia entre las pruebas de cada material no es más del 2%, por lo que se consideran aceptables dichos valores.

Estos valores obtenidos concuerdan con los que la bibliografía indica para materiales de origen volcánico, los cuales varían de 2.6 a 2.9.

4.1.4 Desgaste en la máquina de Los Ángeles

Se realizaron dos pruebas de desgaste a cada tipo de escoria volcánica, los resultados se muestran en el anexo 7.3, y se resumen en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Resultados desgaste en prueba de Los Ángeles.

Resumen porcentaje de desgaste en la prueba de Los Ángeles	XALTEPEC		CERRO GRANDE		TEPEXPAN	
	Prueba		Prueba		Prueba	
	1	2	1	2	1	2
% de desgaste	15.6	17.3	24.4	28.1	30.5	30.8
Valor promedio	16.5		26.3		30.7	

Se observa que el porcentaje de desgaste de la escoria proveniente de Xaltepec es bajo respecto a los otros dos materiales cuyos valores de desgaste son similares entre sí cercanos al 30%, lo anterior se puede explicar ya que los materiales provenientes de San Rómulo son mucho más porosos y su peso específico es menor. Dentro del material de Xaltepec existen granos que son más parecidos a un material basáltico que a un tezontle, debido a los pocos vacíos internos que poseen.

4.1.5 Permeabilidad

Antes de determinar la permeabilidad de los materiales, se realizaron pruebas en el sistema para conocer el orden de magnitud de permeabilidad que es posible llegar a medir. Para esto fue necesario determinar el gradiente hidráulico del sistema, para ello se usaron los parámetros que se muestran en la Tabla 4.6.

Conocido el gradiente hidráulico, se hace fluir agua por el sistema, en la Tabla 4.7 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas.

Tabla 4.6. Datos generales del sistema para determinar el gradiente

Diferencia de altura (m)	1.82
Longitud del permeámetro (m)	0.72
Diámetro del permeámetro (m)	0.57
Gradiente hidráulico (i)	2.53

Tabla 4.7. Medición de la permeabilidad del sistema

Sistema		
Vol (ml)	t (s)	Q (ml/s)
76552.76	27.76	2757.66
51035.17	20.64	2472.63
25517.59	11.27	2264.20
Q promedio (ml/s)=		2498.17
k (cm/s)=		3.87E-01

Luego de conocer el valor y orden de magnitud que es posible medir con el sistema, del orden de 4×10^{-1} , se llevan a cabo las pruebas de permeabilidad con carga constante al material denominado Cerro Grande. Detalles de estas pruebas se muestran en el anexo 7.4. Los resultados se resumen en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Resultados de pruebas de permeabilidad

Resumen pruebas de permeabilidad (i=2.53)	CERRO GRANDE			
	Prueba			
	1	2	3	4
Permeabilidad "k" (cm/s)	1.43×10^{-1}	1.51×10^{-1}	1.61×10^{-1}	1.61×10^{-1}
Valor promedio	1.54×10^{-1}			

Se obtiene que la permeabilidad del material proveniente de San Rómulo, denominado Cerro Grande, es de 1.5×10^{-1} cm/s en promedio.

Luego de realizar estas pruebas se decidió disminuir el gradiente hidráulico, el cual se bajó de 2.53 a 1.68, variando el nivel del tanque de almacenamiento. Las dimensiones detalladas del arreglo para este último gradiente se resumen en la Tabla 4.9 y se muestran en la Figura 3.11.

Tabla 4.9. Datos generales del sistema al bajar el gradiente

Diferencia de altura (m)	1.21
Longitud del permeámetro (m)	0.72
Diámetro del permeámetro (m)	0.57
Gradiente hidráulico (i)	1.68

Los resultados obtenidos de estas nuevas pruebas de permeabilidad, para ambos materiales estudiados, se resumen en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Resultados de permeabilidad con $i=1.68$

Resumen pruebas de permeabilidad ($i=1.68$)	CERRO GRANDE				XALTEPEC			
	Prueba				Prueba			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Permeabilidad "k" (cm/s)	3.26×10^{-1}	3.40×10^{-1}	3.46×10^{-1}	3.53×10^{-1}	3.43×10^{-1}	3.50×10^{-1}	3.53×10^{-1}	3.46×10^{-1}
Valor promedio	3.41×10^{-1}				3.48×10^{-1}			

En el material de Cerro Grande se observa que la permeabilidad, al disminuir el gradiente hidráulico, exhibe un cambio significativo, ya que de 1.5×10^{-1} cm/s cambia a 3.4×10^{-1} cm/s. Por otro lado, es posible deducir que la permeabilidad de ambos materiales tiene ser igual, 3.5×10^{-1} cm/s.

La similitud entre los resultados de las permeabilidades de los materiales y el valor que es posible medir con este sistema, podrían significar que estos tezontles tienen una permeabilidad casi igual a la del sistema en sí, o son aún más permeables y el sistema no permite medirlos con detalle.

En la Figura 4.2 se muestran las granulometrías de los materiales acá ensayados, sobrepuestas en una gráfica que relaciona algunas granulometrías con ciertos valores de permeabilidad para materiales granulares usados en estructuras de pavimento (Rico, 2003).

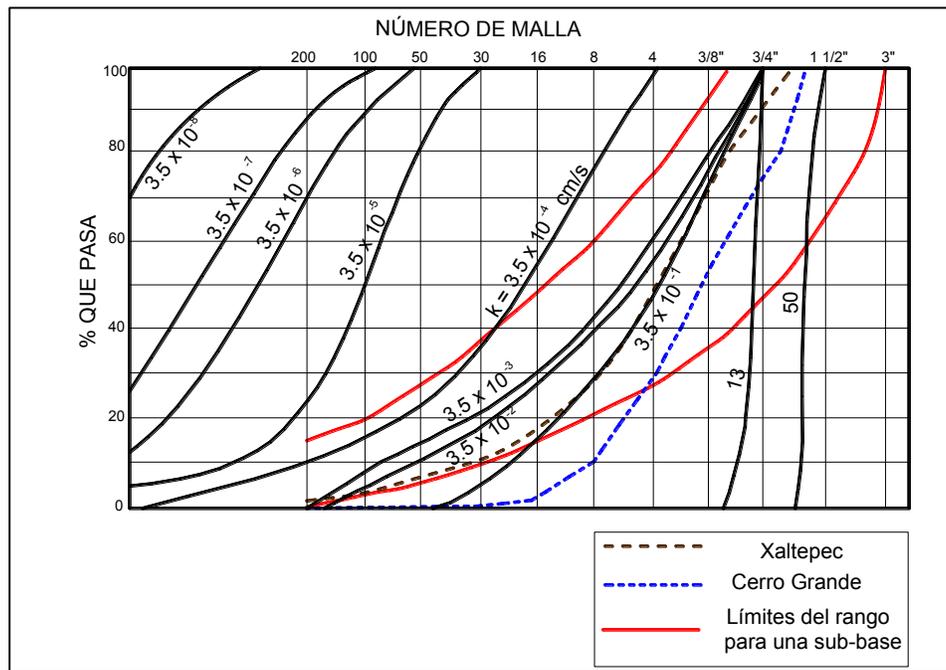


Figura 4.2. Granulometrías de materiales ensayados en las pruebas de Permeabilidad

Se observa que las granulometrías de los materiales Xaltepec y Cerro Grande tienen valores de permeabilidad coherentes con lo que la bibliografía menciona, del orden de 1×10^{-1} cm/s. Adicionalmente, Marsal y Resendiz (1967), dedujeron que la permeabilidad de arenas limpias se encuentra entre 1 y 1×10^{-3} cm/s.

4.1.6 Resultados de la determinación de las compactidades.

4.1.6.1 Material de Xaltepec

En la Tabla 4.11 y en la Figura 4.3 se muestran los resultados de pesos volumétricos obtenidos en función del tiempo de compactación para el material proveniente del banco de materiales Xaltepec. La granulometría usada fue la previamente definida, la humedad de 0.14% es baja, seco para cualquier propósito práctico.

Se realizaron dos, y en ocasiones tres pruebas, para verificar la repetitividad de los resultados y la normalización en el procedimiento de la prueba.

Tabla 4.11. Resultados de pesos volumétricos, material Xaltepec seco

Humedad (%)		
0.14		
Pesos volumétricos (kN/m ³)		
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2
0	12.6	12.5
30	15.6	15.7
60	15.8	15.8
120	16.4	16.3
240	17.3	17.4

Se observa que el valor de peso volumétrico no se estabiliza al aumentar el tiempo de compactación, lo anterior debido a que el material, que se encuentra seco, sufre rotura de granos a medida que se compacta por capas, esto hace que granos rotos de menor tamaño ocupen espacios vacíos y que más material pueda entrar en el molde. Por tal razón, se hace un análisis granulométrico para determinar el rompimiento que existe en los granos durante el proceso de compactación.

La Figura 4.4 muestra el rompimiento de granos que existió en las distintas pruebas. En la prueba en que se compacta durante 240 s cada capa, el material llega a romperse tanto, que la curva resultante ya ni siquiera se parece a la original del material, casi alcanzando el límite aceptable para sub-base, por tanto, no se continúa aumentando el tiempo de compactación.

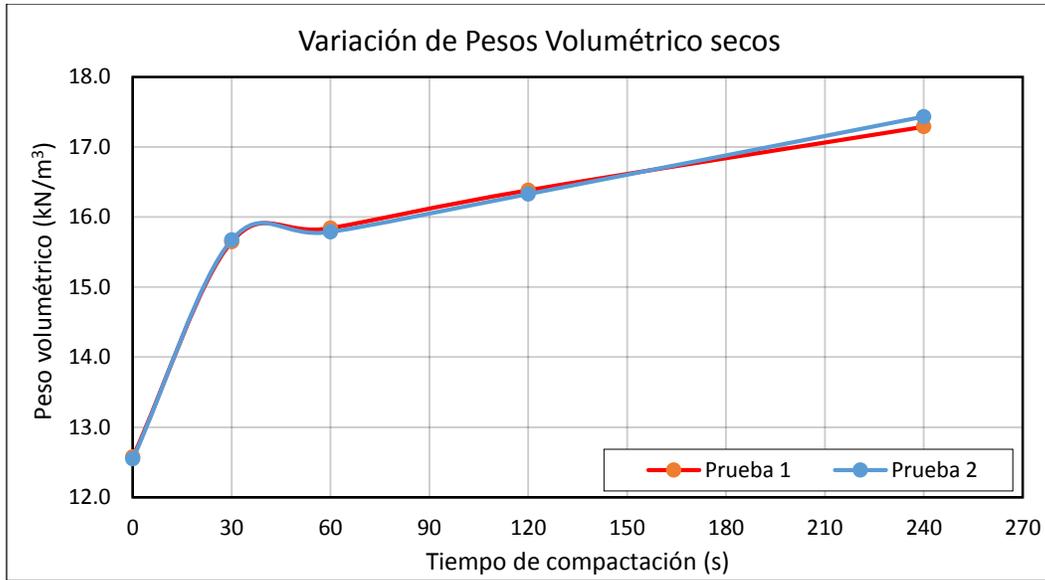


Figura 4.3. Variación del peso volumétrico en función del tiempo de compactación

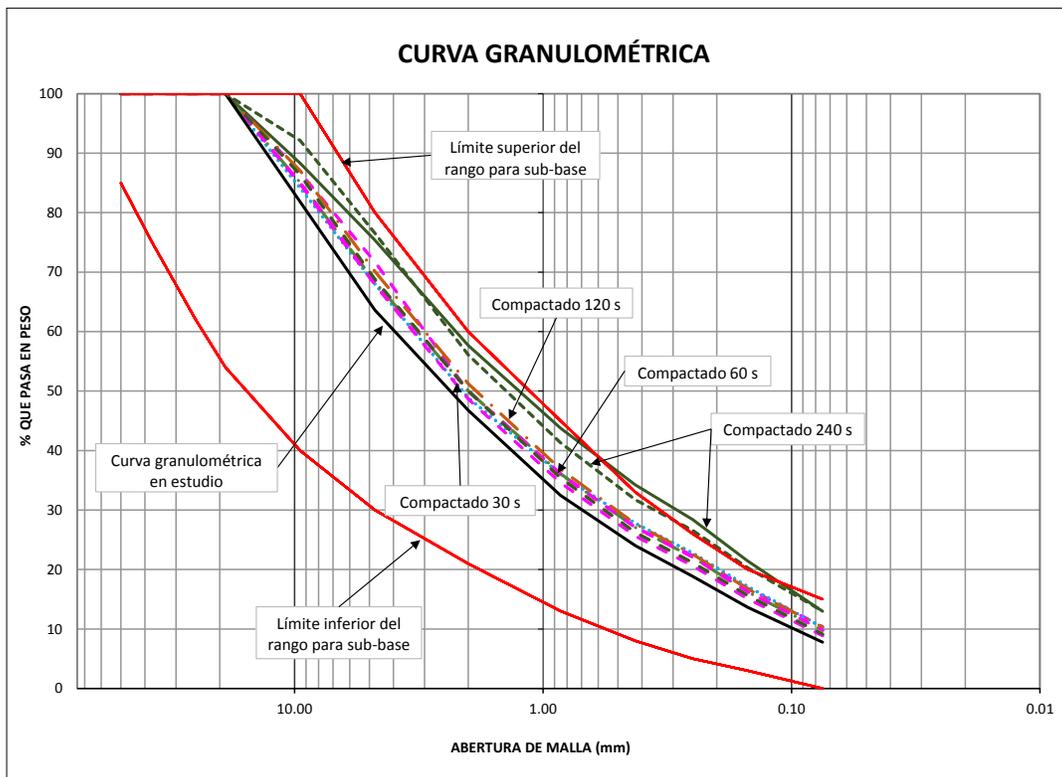


Figura 4.4. Resultado de análisis de rompimiento de granos, material seco Xaltepec

Al realizar las mismas pruebas, pero ahora con el material húmedo (contenido de agua del 12%), se obtienen los resultados de pesos volumétricos que se indican en la Tabla 4.12 y se muestran en la Figura 4.5. Para estas pruebas, además de los tiempos de compactación usados en la prueba con el material seco, se decidió agregar un tiempo

más y compactar cada capa durante 10 s, lo anterior con el fin de conocer con mayor precisión la curva que relaciona los pesos volumétricos con el tiempo de compactación.

Tabla 4.12. Resultados de pesos volumétricos, material Xaltepec húmedo

Humedad (%)	
12.12	

Pesos volumétricos (kN/m ³)		
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2
0	11.5	11.4
10	17.0	17.0
30	17.3	17.4
60	18.6	18.5
120	18.9	18.7
240	19.1	19.2

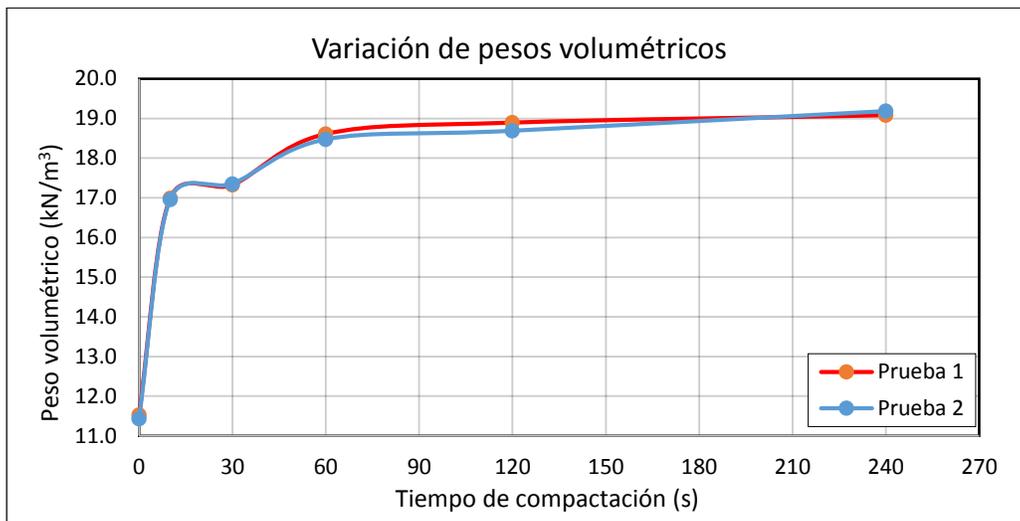


Figura 4.5. Variación del peso volumétrico en función del tiempo de compactación

En la Tabla 4.12 se observa que el valor del peso volumétrico obtenido al compactar cada capa durante 120 s no es muy diferente al obtenido compactando las capas por 240 s. Debido a ello, es posible asegurar que dicho valor corresponde al peso volumétrico máximo que el material alcanza, o lo que es lo mismo, el 100% de la compactación relativa.

De la misma forma en que se hizo cuando el material se compactó seco, en este caso se hizo un análisis de rompimiento de granos para cada una de las cinco pruebas (10, 30, 60, 120 y 240 s); sus resultados se muestran en la Figura 4.6.

De lo anterior es evidente que cuando se compacta el material con cierta humedad, los granos no sufren de una rotura que cambie, de manera significativa, su curva granulométrica. Por lo que se concluye que de hacer las pruebas con esta humedad, la curva granulométrica ensayada en la cámara triaxial correspondería a la definida para el estudio.

Partiendo de los pesos volumétricos obtenidos para cada una de las pruebas, y conociendo la humedad, es posible determinar los pesos volumétricos secos correspondientes, con el uso de la siguiente ecuación.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + w}$$

Donde:

γ_d : peso volumétrico seco, kN/m³.

γ_m : peso volumétrico húmedo, kN/m³.

w : contenido de agua, %.

En la Tabla 4.13 se muestran los valores de pesos volumétricos secos obtenidos a partir de los pesos volumétricos totales mostrados en la Tabla 4.12. Dichos valores se muestran gráficamente en la Figura 4.7.

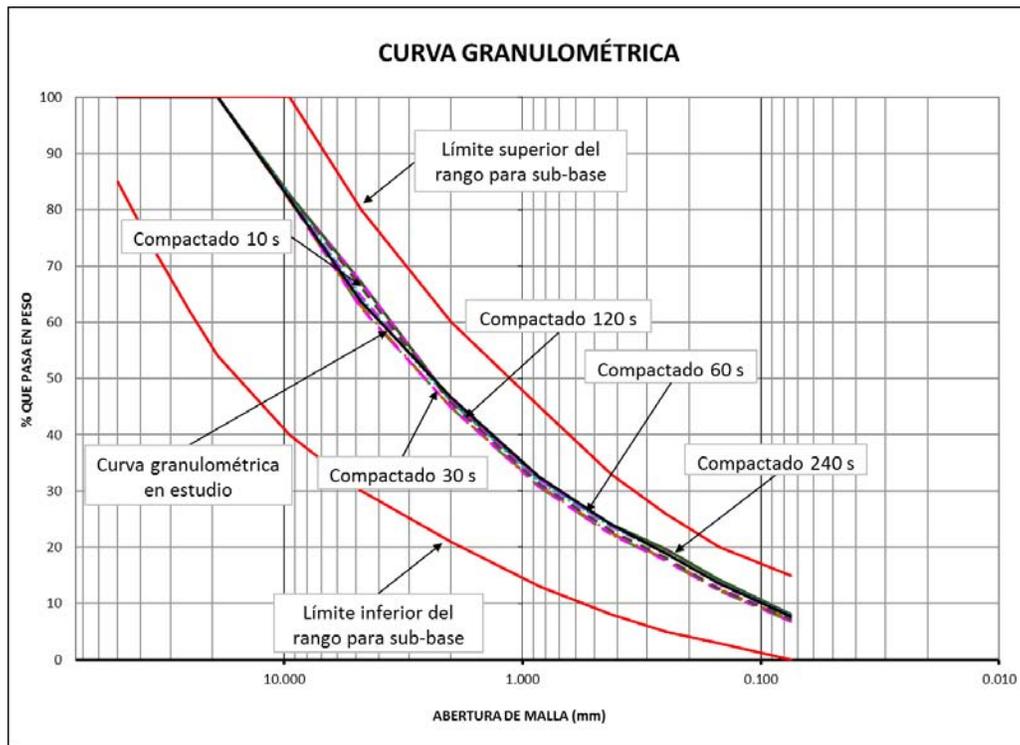


Figura 4.6. Resultados de análisis rompimiento de granos, Xaltepec

Tabla 4.13 Pesos volumétricos secos, Xaltepec.

Humedad (%)		
12.12		
Pesos volumétricos secos (kN/m³)		
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2
0	10.3	10.2
10	15.2	15.1
30	15.5	15.5
60	16.6	16.5
120	16.9	16.7
240	17.0	17.1

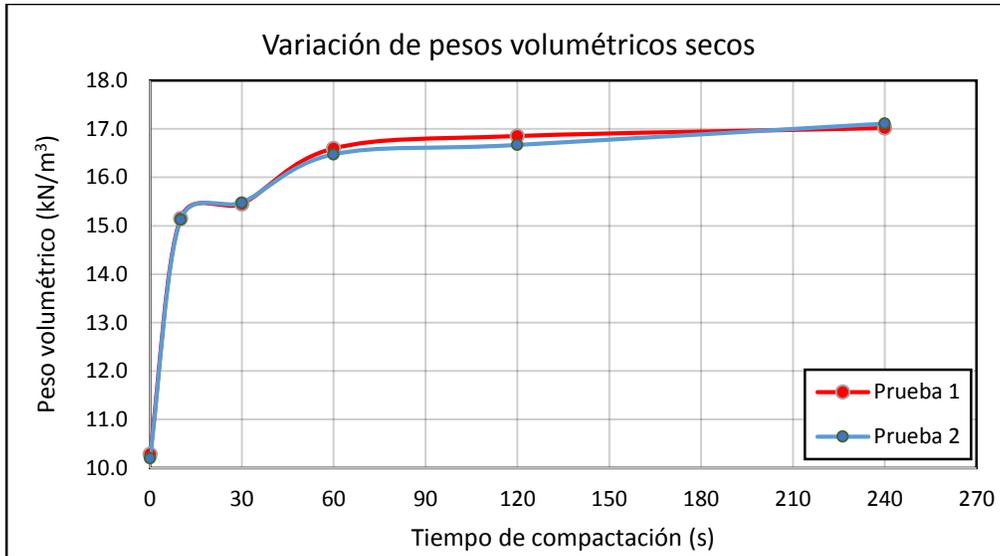


Figura 4.7. Variación de pesos volumétricos secos, material Xaltepec

En la Tabla 4.14 se resumen los resultados de las pruebas anteriores.

Tabla 4.14. Resumen resultados de pesos volumétricos, Xaltepec

XALTEPEC		
	Pesos volumétricos (kN/m³)	Pesos volumétricos secos (kN/m³)
Mínimo	11.44	10.20
Máximo	19.19	17.11

De las Figuras 4.3, Figura 4.5 y Figura 4.7 se puede deducir que la escoria volcánica es un material que gana rigidez y aumenta su peso volumétrico con gran facilidad. Algo que ratifica la idea anterior es el hecho de que con apenas 9 segundos de vibración, alcance el 75% de la compacidad relativa máxima, misma que se logra con 240 segundos de ese proceso vibratorio.

4.1.6.2 Material de Cerro Grande

En este material se realizaron las mismas pruebas de compactación que en el material de Xaltepec, excepto aquellas donde se usó material seco. En este caso todas las pruebas tenían una humedad que fluctuaba entre 10 y 12%. En la Tabla 4.15 se muestran los tiempos de compactación y los resultados de pesos volumétricos secos obtenidos, mismos que se grafican en la Figura 4.8. Para estas pruebas, además de los tiempos de compactación ya definidos, se determinó el peso volumétrico generado solamente por el peso propio del vibrador, esto es, sin vibración.

Tabla 4.15. Pesos volumétricos secos, Cerro Grande

Sub-Base con humedad (%)		
11.0		
Pesos volumétricos secos (kN/m³)		
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2
0	8.9	8.8
Peso de vibrador	10.0	9.9
10	12.4	12.4
30	12.9	13.0
60	13.1	13.1
120	13.1	13.4

Al no presentarse una variación relevante entre el peso volumétrico obtenido entre 60 segundos y 120 segundos, se estableció este último valor como el máximo que alcanza el material, y no se llevó a cabo una compactación de 240 segundos por capa.

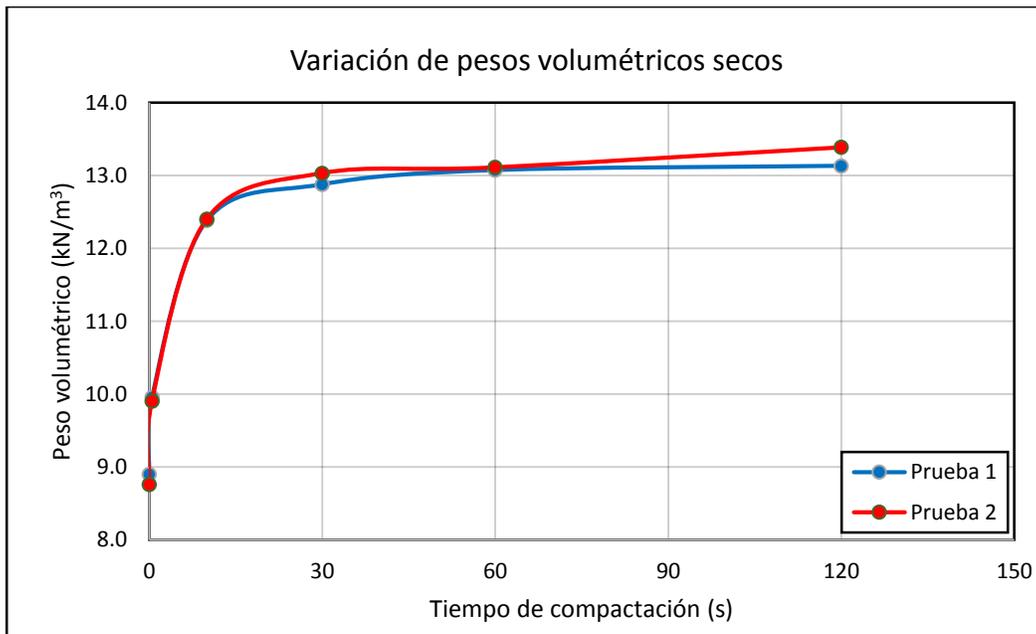


Figura 4.8. Variación de pesos volumétricos secos, material Cerro Grande

El análisis granulométrico luego de la compactación muestra que sí existe un rompimiento de partículas (Ver Figura 4.9), se aprecia que el material retenido en el

tamiz No. 50 es el que presenta mayor rotura de granos, convirtiéndose ahora en material que retiene el tamiz No. 100 y 200.

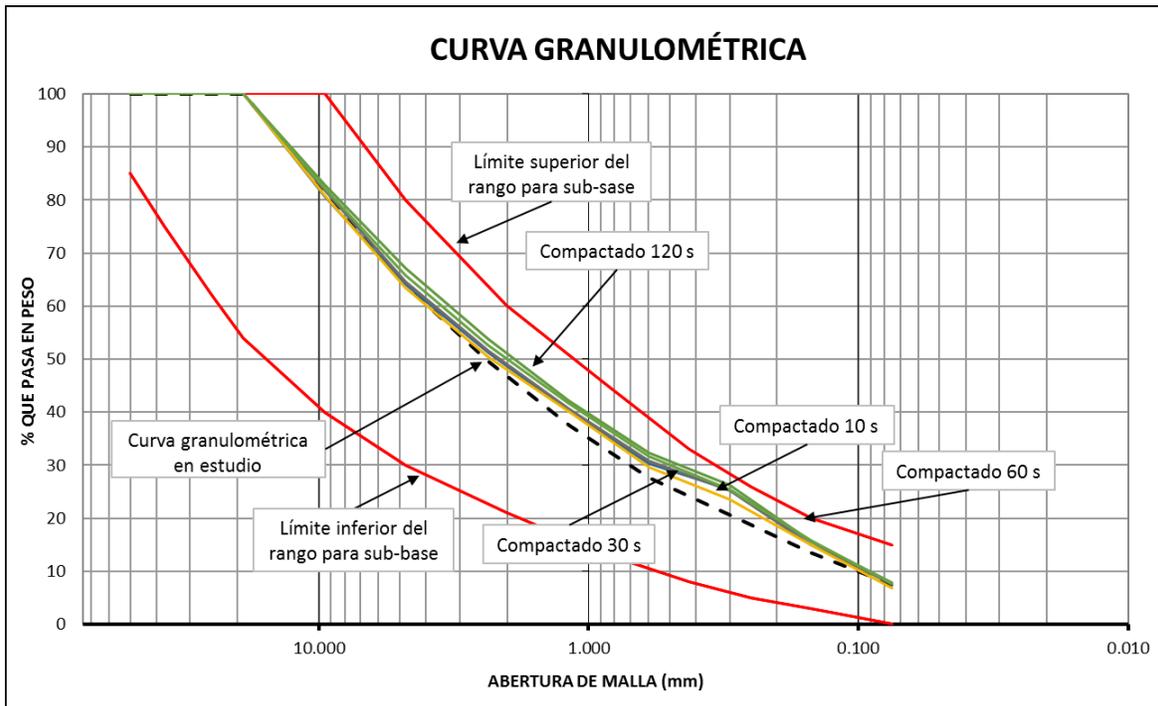


Figura 4.9. Resultados de análisis rompimiento de granos, Cerro Grande

Los resultados resumidos de las pruebas de compactación de este material se muestran en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16. Resumen resultados de pesos volumétricos, Cerro Grande

CERRO GRANDE		
	Pesos volumétricos (kN/m ³)	Pesos volumétricos secos (kN/m ³)
Mínimo	9.72	8.76
Máximo	14.86	13.39

4.1.6.3 Material de Tepexpan

En este material se realizaron las mismas pruebas hechas al tezontle proveniente de Cerro Grande. Los resultados se muestran en la Tabla 4.17 y en la Figura 4.10. Se observa que el comportamiento de los pesos volumétricos en función del tiempo, es similar a los otros dos materiales estudiados previamente.

Tabla 4.17. Pesos volumétricos secos, Tepexpan

Sub-Base con humedad (%)		
12.22		
Pesos volumétricos secos (kN/m³)		
Tiempo (s)	Prueba 1	Prueba 2
0	9.3	9.3
Peso del vibrador	11.2	11.1
10	13.9	13.9
30	13.9	13.9
60	14.4	14.4
120	15.3	15.3
240	15.6	15.7

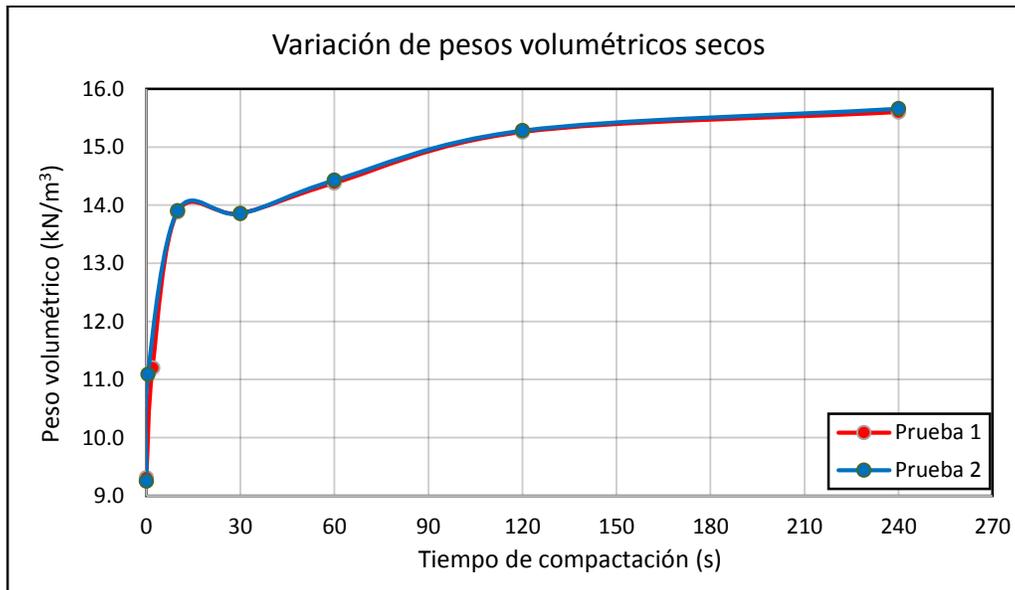


Figura 4.10. Variación de pesos volumétricos secos, material Tepexpan

El análisis de rompimiento de granos que se muestra en la Figura 4.11 indica una rotura significativa del material alcanzando incluso, para el mayor tiempo de compactación, a quedar por fuera de los rangos establecidos por la normativa para un material de calidad sub-base. Se presenta también en el material retiene tamiz No.50 una marcada tendencia a la rotura.

Para poder entender de mejor forma el porqué de la rotura tan marcada que existe en un tamaño de los materiales provenientes de San Rómulo, se debería hacer algún análisis mineralógico.

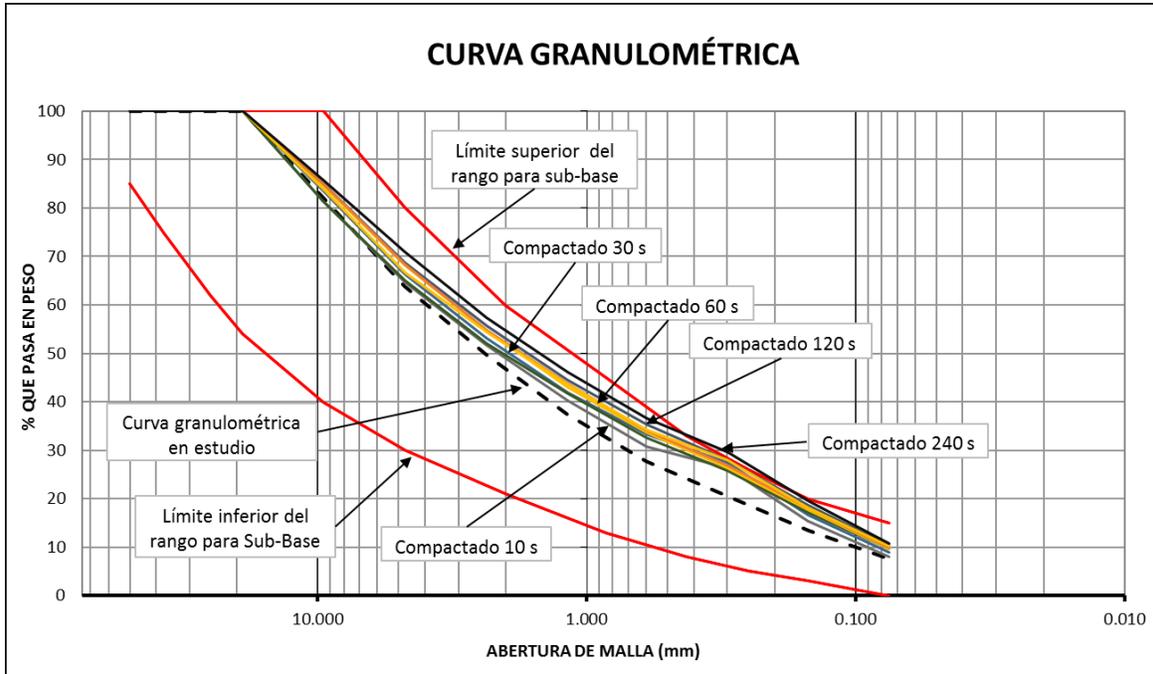


Figura 4.11. Resultados de análisis rompimiento de granos, Tepexpan

Los resultados resumidos de pesos volumétricos, tanto secos como totales, se muestran en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18. Resumen resultados de pesos volumétricos, Tepexpan

TEPEXPAN		
	Pesos volumétricos (kN/m ³)	Pesos volumétricos secos (kN/m ³)
Mínimo	10.52	9.37
Máximo	17.35	15.52

Luego de todas las pruebas de compactación, se obtienen los pesos volumétricos máximos y mínimos de los tres materiales estudiados. Dichos resultados se resumen en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19. Resumen general de pesos volumétricos

Pesos volumétricos (kN/m ³)	XALTEPEC		CERRO GRANDE		TEPEXPAN	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Pesos volumétricos totales	11.44	19.19	9.72	14.86	10.52	17.35
Pesos volumétricos secos	10.2	17.11	8.76	13.39	9.37	15.52

Partiendo de la ecuación que relaciona la compacidad relativa de un material con sus pesos volumétricos máximos y mínimos, es posible establecer una nueva que indique, con base en la compacidad relativa que se desea alcanzar, el peso volumétrico que debe tener el material para lograr dicha compacidad. Dicha ecuación es:

$$\gamma_{Dr} = \frac{\gamma_{min}}{1 - \frac{Dr}{100} \left(1 - \frac{\gamma_{min}}{\gamma_{max}}\right)}$$

Con la ecuación anterior y los resultados que se muestran en la Tabla 4.19 es posible determinar, para cada uno de los materiales, el peso volumétrico que se debe alcanzar para representar determinada compactación. Luego de conocer dicho valor, con ayuda de las gráficas que relacionan tiempos de vibrado con pesos volumétricos, se define el tiempo requerido de compactación para llevar a cada material al valor deseado de peso volumétrico.

4.2 Resultado de las pruebas triaxiales.

En los siguientes apartados se indican los resultados obtenidos de las pruebas triaxiales realizadas a los tres tipos de escoria volcánica.

4.2.1 Material de Xaltepec

Como ya se mencionó, se definieron tres compacidades relativas para realizar las pruebas triaxiales, una baja, una media y una alta. Se realizaron algunas pruebas con este material en el molde triaxial para reproducir una compacidad cercana al 30%, la cual se lograría compactando cada capa por 2 segundos. Lo anterior fue difícil de lograr debido a la gran facilidad con la que este material gana rigidez, y a que durante las pruebas de compactación, para este material en particular, no se determinó el peso volumétrico obtenido debido solamente al peso propio del vibrador; el efecto del peso del vibrador toma relevancia a tiempos pequeños de compactación y la pierde a medida que éste se va haciendo mayor.

Por lo anterior, para las pruebas triaxiales se definieron las compacidades relativas que se indican en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20. Valores de compacidad relativa para pruebas triaxiales

Dr (%)	(γ_d) (kN/m³)	Tiempo (s)
62	13.6	5
75	14.6	9
95	16.5	60

Para cada compacidad se llevaron a cabo tres pruebas triaxiales usando los siguientes esfuerzos de confinamiento (29.4, 58.8 y 117.1 kPa). La humedad buscada en estas pruebas es la misma con la que se hicieron las pruebas de compactación (12%).

Los resultados del comportamiento esfuerzo desviador-deformación unitaria de dichas pruebas se muestran en la Figura 4.12, de igual forma, en la Figura 4.13 se muestran los círculos de Mohr que representan dicho comportamiento.

Compacidad relativa del 62%

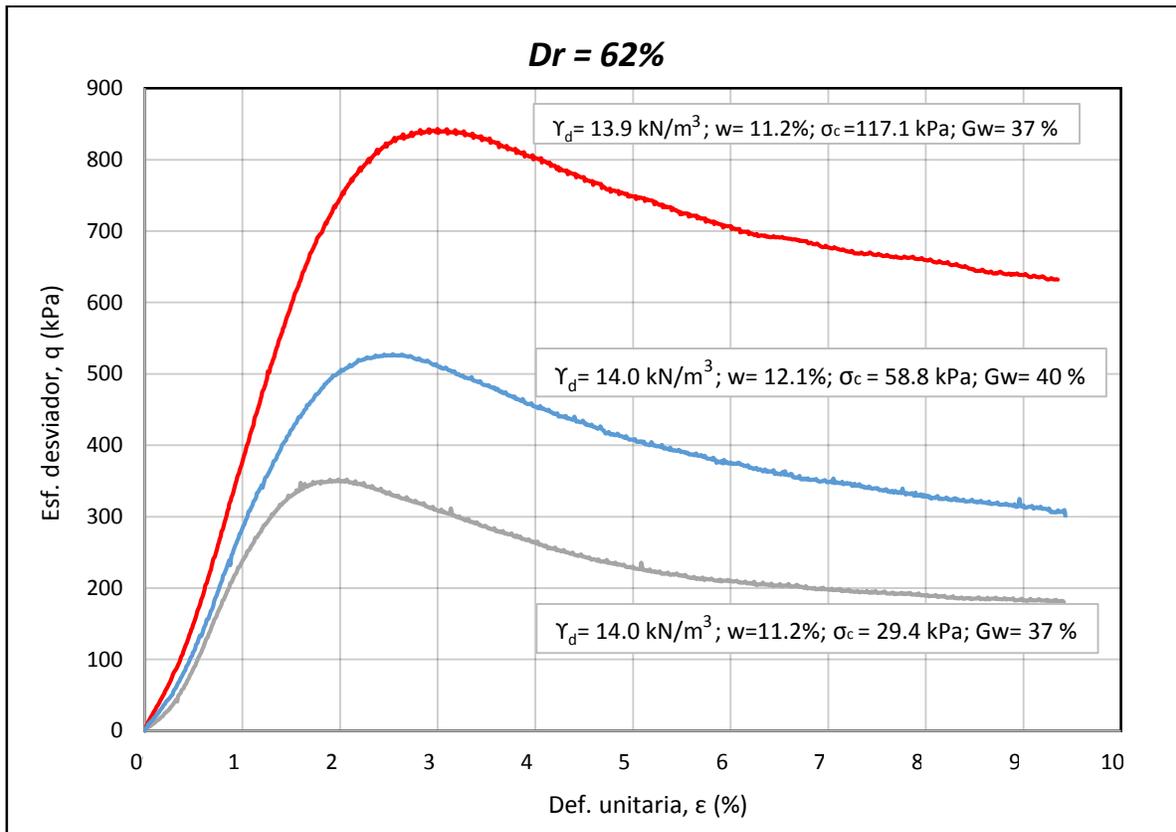


Figura 4.12. Comportamiento Esfuerzo-Deformación. Dr=62%

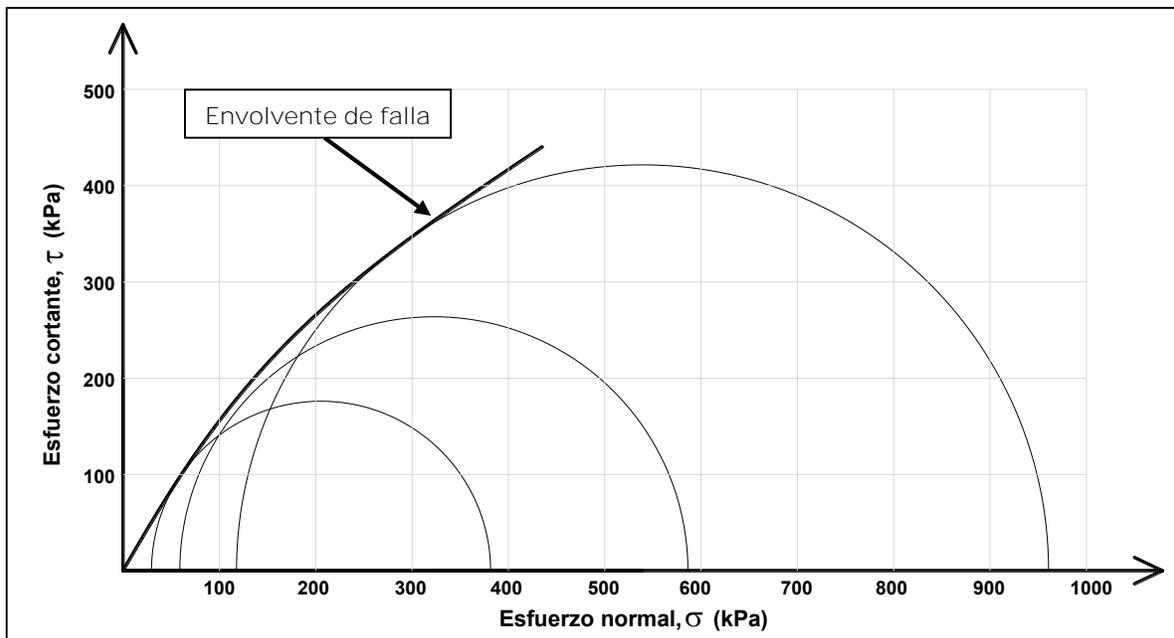


Figura 4.13. Círculos de Mohr. Dr=62%

Debido al comportamiento del material, la envolvente de falla que se obtiene es curva, indicando mayores valores de ángulo de fricción para pequeños valores de esfuerzo de confinamiento y menores para mayores esfuerzos confinantes.

Como hipótesis de trabajo, se asumieron los ángulos de fricción internos como los que corresponden a la recta que va del origen de coordenadas a la tangente al círculo de Mohr de que se trata. Así, en la medida que prevalece la concavidad de la envolvente, el ángulo ϕ secante resulta una subestimación del ángulo verdadero; por el contrario, para la porción lineal de la envolvente, el ángulo ϕ así asumido resulta mayor al ángulo tangente a la envolvente.

Los ángulos de fricción que se muestran en esta investigación se determinaron con la ecuación:

$$\text{Sen } \phi = \frac{(\sigma_{1f} - \sigma_{3f})}{(\sigma_{1f} + \sigma_{3f})}$$

Donde:

- σ_{1f} : Esfuerzo principal mayor en la falla.
- σ_{3f} : Esfuerzo confinante o principal menor en la falla.
- ϕ : Ángulo de fricción interno

La Tabla 4.21 muestra algunos parámetros relevantes obtenidos de las pruebas triaxiales realizadas al material Xaltepec. Los altos valores de ángulos de fricción concuerdan con aquellos obtenidos en otras investigaciones realizadas previamente en otros tipos de escorias volcánicas.

Tabla 4.21. Resultados de pruebas triaxiales $Dr=62\%$

Compacidad relativa (%)	Humedad (%)	Peso volumétrico seco (γ_d) (kN/m ³)	Esfuerzo de Confinamiento " σ_c " (kPa)	Esfuerzo desviador "q" (kPa)	Esfuerzo cortante (τ) (kPa)	Ángulo de fricción interno (°)
62	11.2	14.0	29.4	352.1	176.1	59
	12.1	14.0	58.9	527.5	263.8	55
	11.2	13.9	117.7	843.1	421.5	51

Luego de la prueba triaxial se realizó un análisis de rompimiento de granos, adicional al que se llevó a cabo durante el proceso de compactación para determinar el grado de rotura debido a la prueba en sí (Ver Figura 4.14). Este análisis se lleva a cabo comparando la curva granulométrica del material con que se realizó la prueba y la obtenida luego de que se llegó a la falla de la probeta.

En el análisis hecho durante la etapa de compactación no se tiene una curva de análisis de rotura para una compactación de 5 segundos, por lo que en la Figura 4.14 se muestran la rotura general de partículas, sin diferenciar si se dio en el proceso de compactación o en el de la prueba triaxial. Se observa que ocurre un rompimiento mínimo de granos. Este hecho puede deberse a una diferencia experimental y quizás no por rotura de granos.

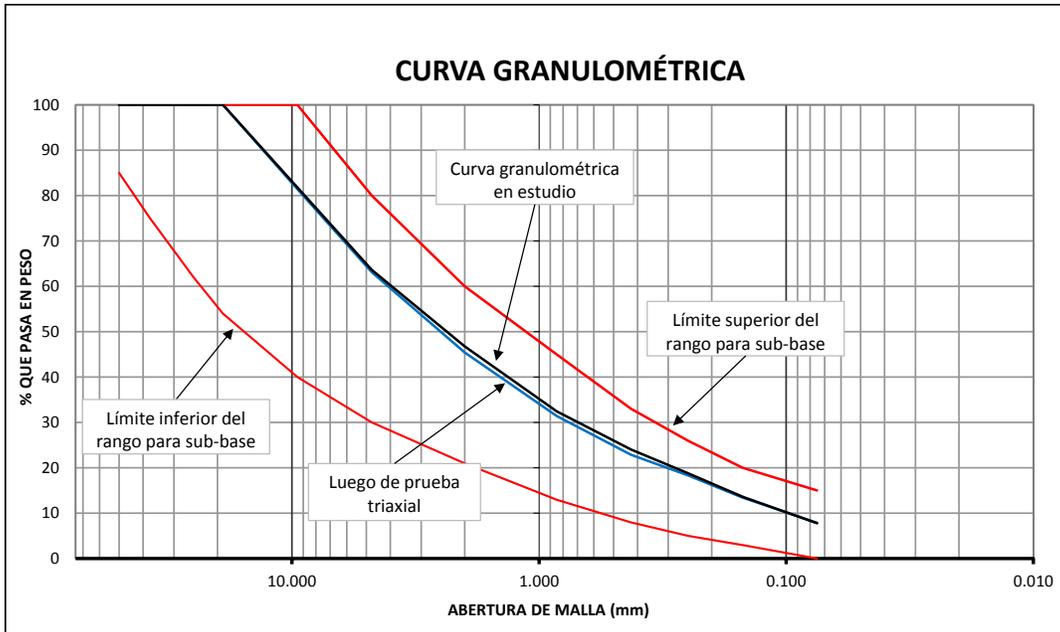


Figura 4.14. Análisis de rompimiento de partículas, $D_r=62\%$

Compacidad relativa del 75%

Para las pruebas correspondientes al 75% de la compacidad relativa se compactó el material durante 9 segundos, obteniendo pesos volumétricos de 14.9 kN/m^3 . Los resultados obtenidos se muestran en Figura 4.15.

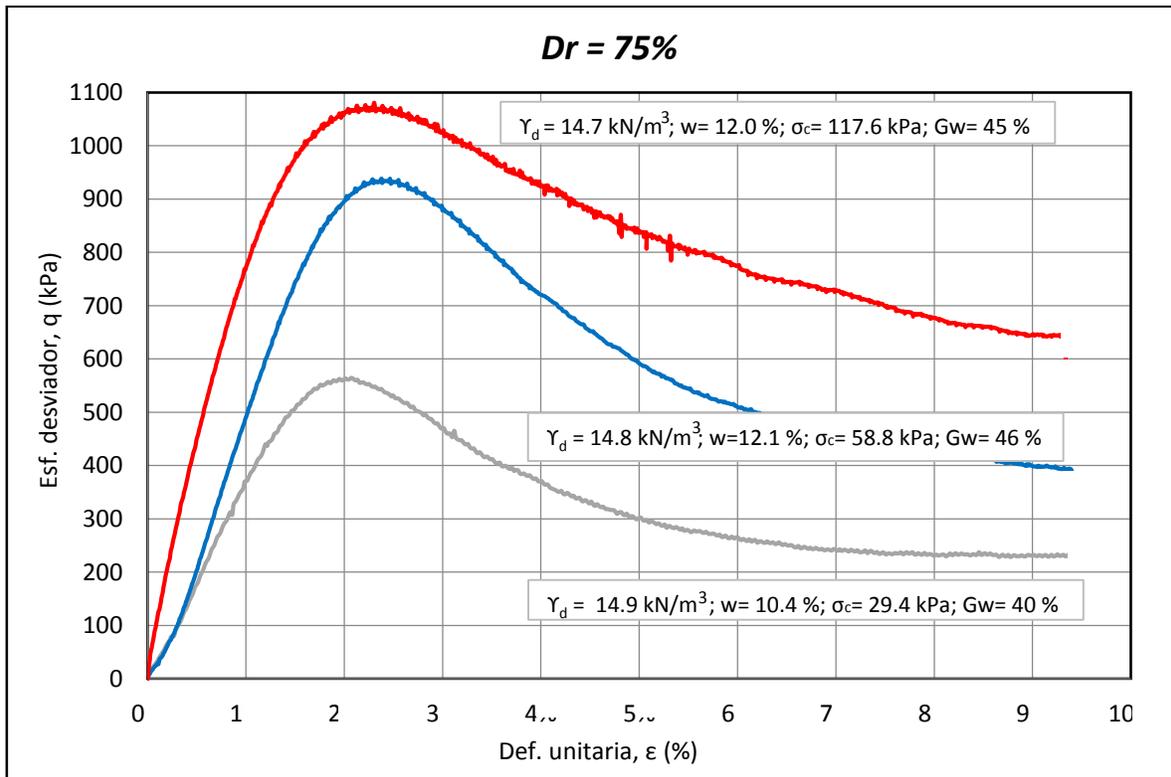


Figura 4.15. Comportamiento Esfuerzo-Deformación. $D_r=75\%$

En estos resultados se observa que la envolvente de falla empieza a tornarse un poco más curva que en la prueba con densidad relativa más baja (Ver Figura 4.16). Lo anterior ocasiona que el valor de ángulo de fricción no sea valor constante sino que varíe en función del esfuerzo de confinamiento en cada prueba.

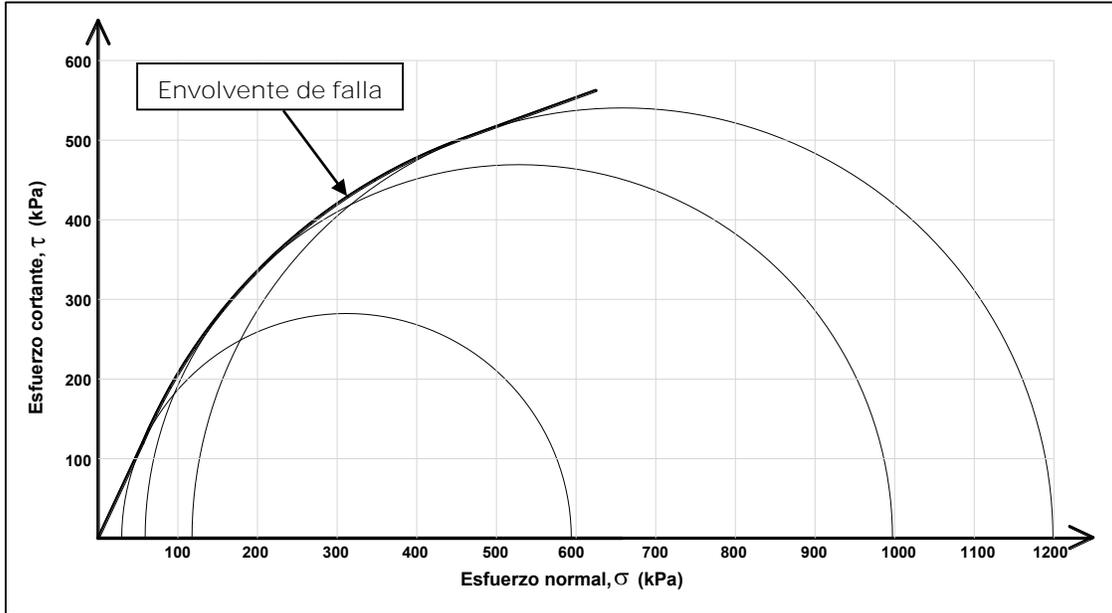


Figura 4.16. Círculos de Mohr. $D_r=75\%$

Los parámetros principales que se obtienen de estas pruebas se resumen en la Tabla 4.22. Los valores de ángulos de fricción aumentan respecto a la Tabla 4.21, lo que indica que la compactación es un factor que influye de gran forma en el comportamiento de este material.

Tabla 4.22. Resultados de pruebas triaxiales $D_r=75\%$

Compacidad relativa (%)	Humedad (%)	Peso volumétrico seco (γ_d) (kN/m ³)	Esfuerzo de Confinamiento " σ_c " (kPa)	Esfuerzo desviador " q " (kPa)	Esfuerzo cortante (τ) (kPa)	Ángulo de fricción interno (°)
75	10.4	14.9	29.4	564.6	282.3	65
	12.1	14.8	58.9	938.4	469.2	63
	12.0	14.7	117.7	1081.1	540.5	55

Para analizar el rompimiento de granos es posible usar la curva que representa la compactación durante 10 segundos, ya que el tiempo es casi igual. En la Figura 4.17 se aprecia que ambas curvas granulométricas quedan encimadas, por lo que se puede concluir que el rompimiento que existió en el material se debió solamente a la compactación y que fue moderado.

Compacidad relativa del 95%

El comportamiento esfuerzo desviador–deformación unitaria de la escoria volcánica con una compacidad relativa del 95% (compactada por 60 s) se muestra en la Figura 4.18.

La prueba en la que se usó un esfuerzo confinante $\sigma_c=117.7$ kPa no se terminó ya que la probeta no alcanzó a fallar. Lo anterior debido a que la capacidad de la celda de carga, 2.5 toneladas, no fue suficiente para fallarla, sin embargo, se presentan los resultados hasta donde fue posible registrarlos.

En la Figura 4.19 se presentan los círculos de Mohr que representan dicho comportamiento.

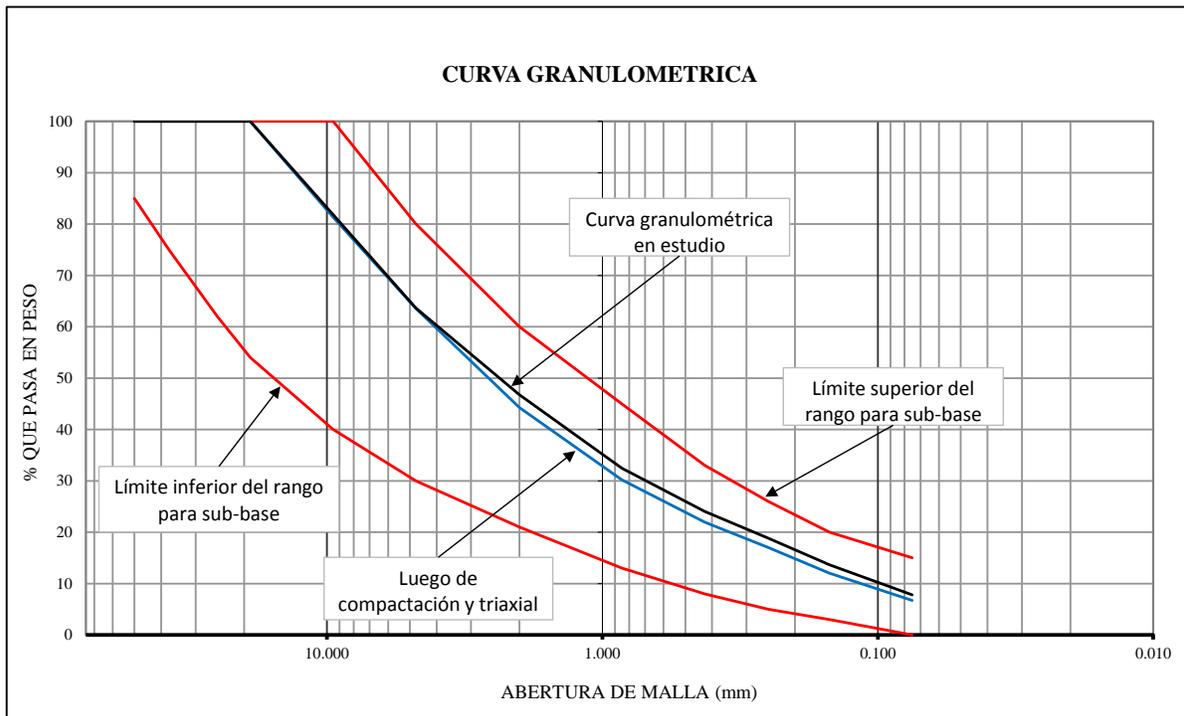


Figura 4.17. Rompimiento de partículas luego de prueba triaxial para $D_r=75\%$

Los parámetros que se obtuvieron de estas pruebas se muestran en la Tabla 4.23. Se aprecia claramente que los ángulos de fricción aumentan respecto a la compacidad anterior, y que éstos disminuyen al ser mayor el confinamiento.

Tabla 4.23. Resultados de pruebas triaxiales $D_r=95\%$

Compacidad relativa (%)	Humedad (%)	Peso volumétrico seco (γ_d) (kN/m ³)	Esfuerzo de Confinamiento " σ_c " (kPa)	Esfuerzo desviador " q " (kPa)	Esfuerzo cortante (τ) (kPa)	Ángulo de fricción interno (°)
95	12.1	16.15	29.4	888.4	444.2	70
	10.9	15.72	58.9	1085.7	542.9	64
	12.5	16.15	117.7			

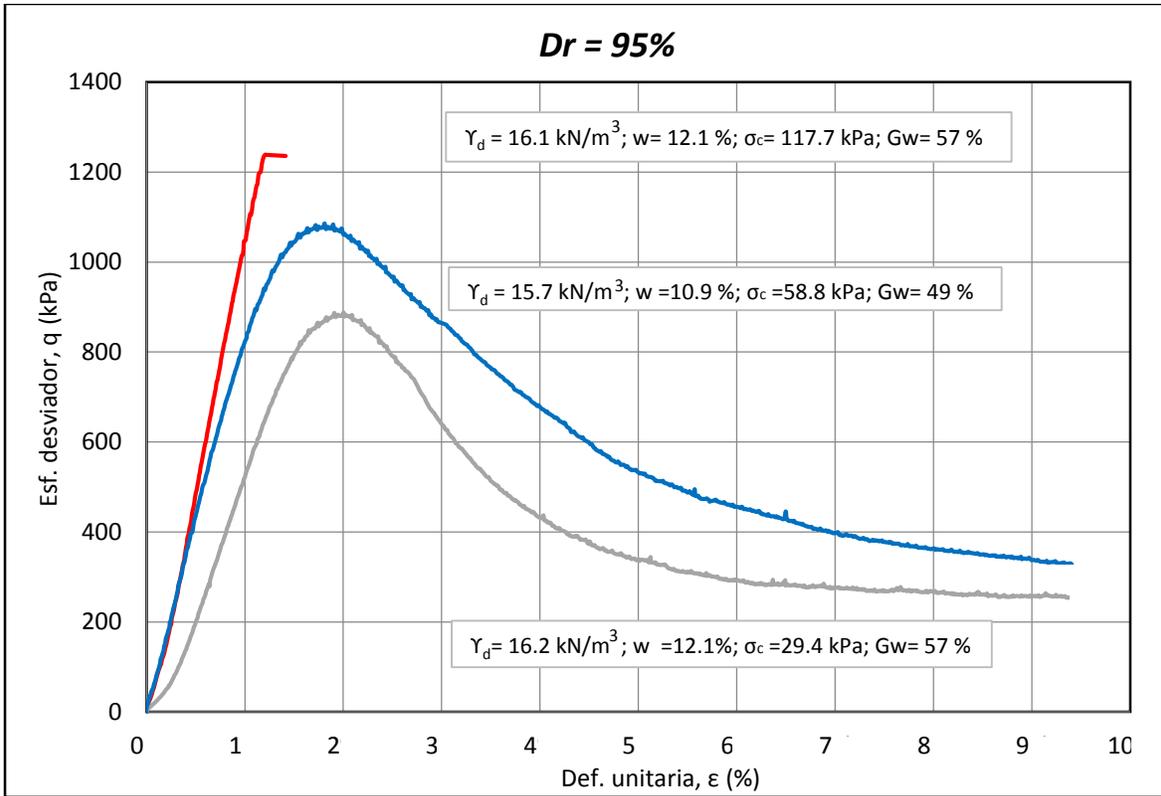


Figura 4.18. Comportamiento Esfuerzo - Deformación. Dr=95%

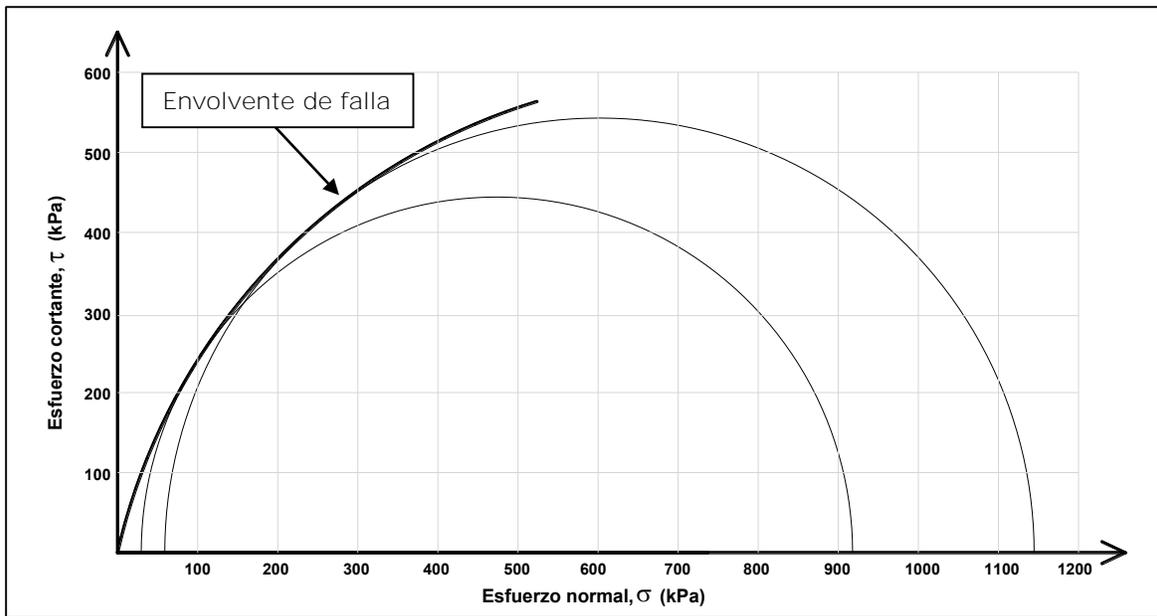


Figura 4.19. Círculos de Mohr. Dr=95%

En la Figura 4.20 se muestran los resultados del análisis de rotura de granos. Para este caso sí se cuenta con una curva de análisis de rotura ya que los tiempos de compactación son los mismos. Al igual que en el caso anterior, se observa que quedan casi

perfectamente una sobre la otra, lo que indica que la rotura de partículas se produce mayoritariamente durante el proceso de compactación.

La Tabla 4.24 muestra resumidos los datos obtenidos de las pruebas realizadas a la escoria volcánica compactada proveniente de Xaltepec, junto con los módulos de deformabilidad obtenidos de éstas. El análisis de la variación de los módulos de elasticidad se muestra más adelante en este capítulo.

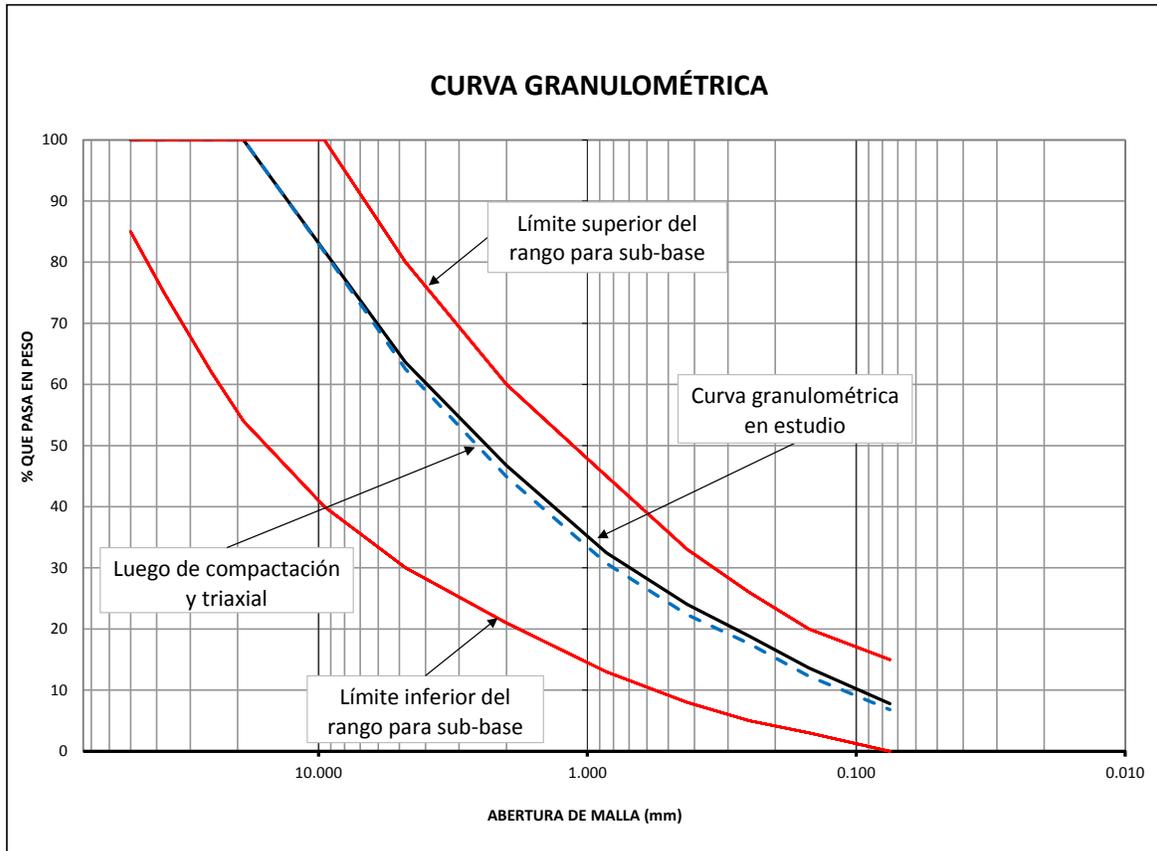


Figura 4.20. Análisis de rotura de partículas. $D_r=95\%$

Tabla 4.24. Resumen de datos obtenidos en las pruebas triaxiales, Xaltepec

Compacidad relativa (%)	Humedad (%)	Peso volumétrico seco (γ_d) (kN/m ³)	Esfuerzo de Confinamiento " σ_c " (kPa)	Esfuerzo desviador "q" (kPa)	Esfuerzo cortante (τ) (kPa)	Ángulo de fricción interno (°)
62	11.2	14.0	29.4	352.1	176.1	59
	12.1	14.0	58.9	527.5	263.8	55
	11.2	13.9	117.7	843.1	421.5	51
75	10.4	14.9	29.4	564.6	282.3	65
	12.1	14.8	58.9	938.4	469.2	63
	12.0	14.7	117.7	1081.1	540.5	55
95	12.1	16.15	29.4	888.4	444.2	70
	10.9	15.72	58.9	1085.7	542.9	64
	12.5	16.15	117.7			

Módulos de Deformabilidad "Xaltepec"			
Esfuerzo de confinamiento (σ_3)	D _r = 62%	D _r = 75%	D _r = 95%
	Módulos (E ₅₀)	Módulos (E ₅₀)	Módulos (E ₅₀)
kN/m ³	kPa	kPa	kPa
29.43	22,274	37,137	50,743
58.86	28,446	48,786	86,613
117.72	38,548	86,350	

4.2.2 Material de Cerro Grande

Con el material denominado Cerro Grande se desarrollaron pruebas triaxiales llevando el material a una compactación relativa del 75%. Lo anterior se logró compactando el material durante 7 segundos; esto con base en los resultados obtenidos y mostrados en la Tabla 4.19 y Figura 4.8.

Estas pruebas se realizaron a carga controlada, por lo que los datos de la resistencia residual no se obtuvieron con precisión suficiente; sin embargo, los resultados presentan un comportamiento similar al material previamente ensayado, mostrando un pico y una disminución de la resistencia luego de éste.

El comportamiento esfuerzo-deformación de este material se muestra en la Figura 4.21 y los círculos de Mohr que representan dicho comportamiento en la Figura 4.22.

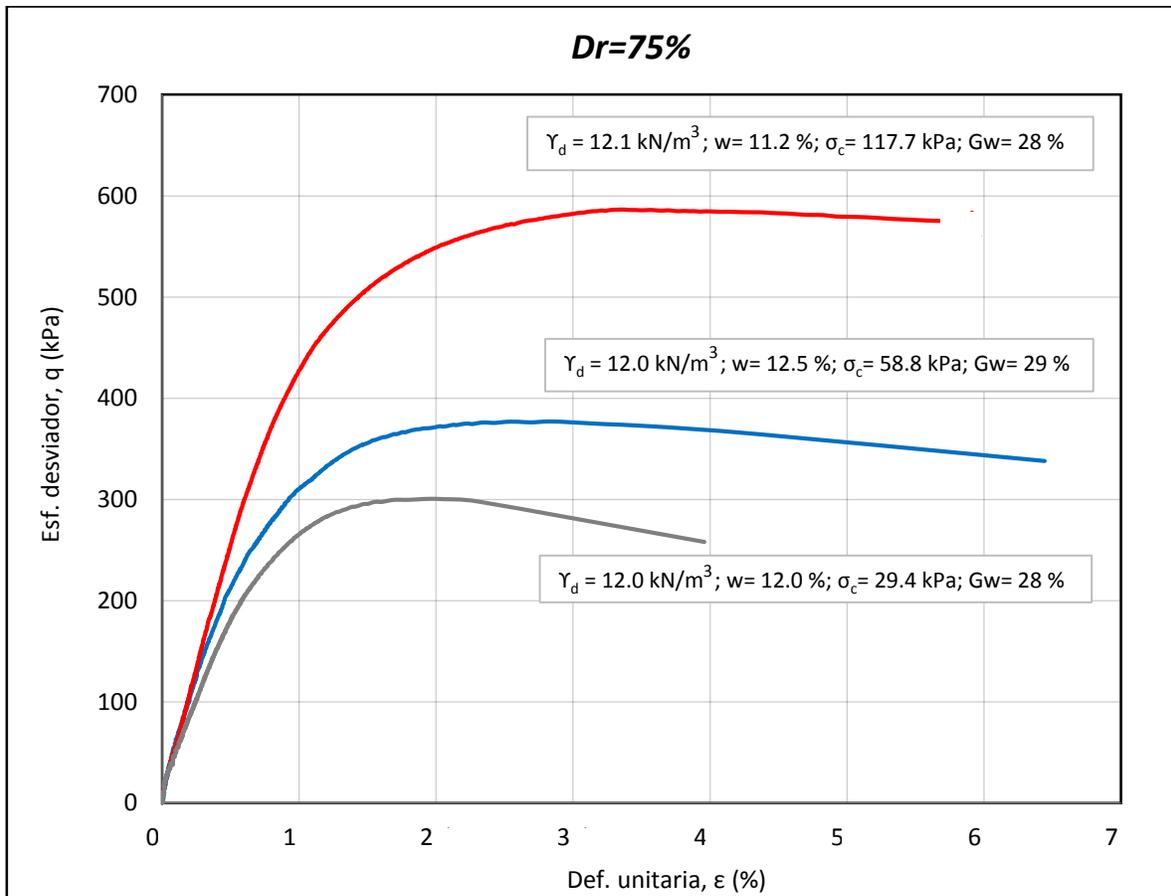


Figura 4.21. Comportamiento Esfuerzo-Deformación, Cerro Grande. Dr 75%

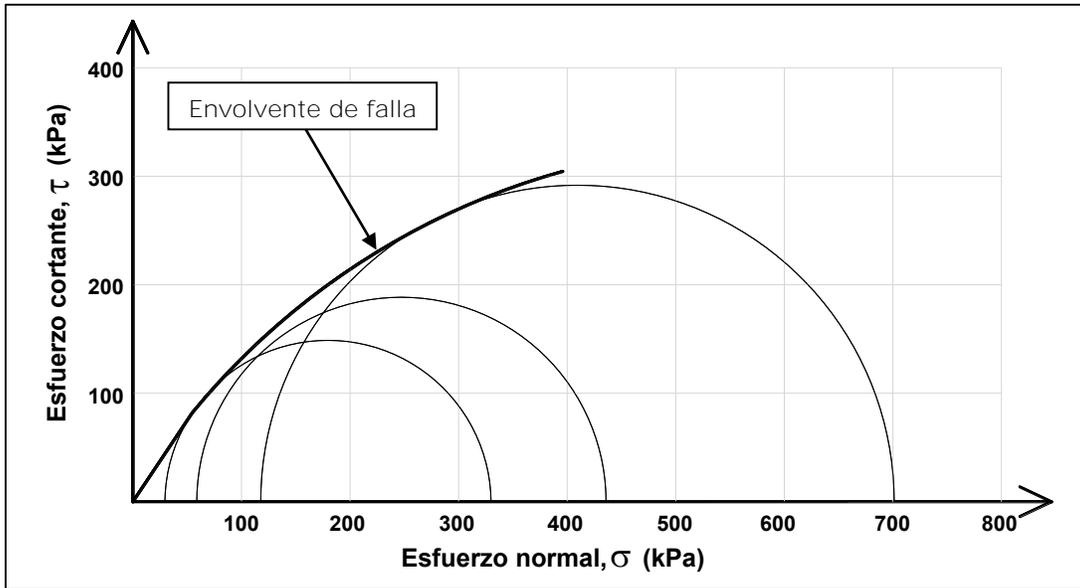


Figura 4.22. Círculos de Mohr, Cerro Grande

Del análisis de rompimiento de partículas que se muestra en la Figura 4.23, es posible concluir que el material que tiende a romperse en mayor medida es el tamaño correspondiente al que retiene el tamiz No. 50; esto concuerda con el análisis de rotura realizado durante la compactación. Igualmente, se puede apreciar que la rotura de este material es similar a la presentada por el que fue compactado por 10 segundos en cada capa.

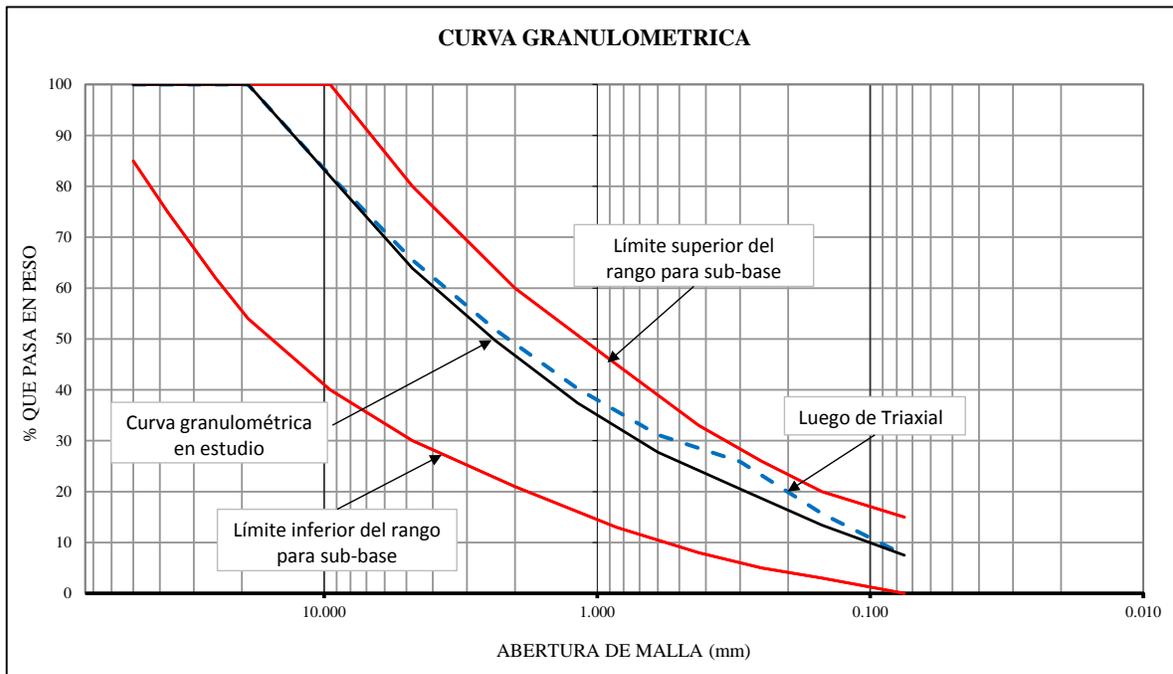


Figura 4.23. Análisis de rompimiento de partículas, Cerro Grande

La Tabla 4.25 muestra en resumen los datos obtenidos de estas pruebas, es claro que los ángulos de fricción disminuyen a medida que aumenta el esfuerzo confinante.

Tabla 4.25. Resultados de pruebas triaxiales, Cerro Grande

TABLA DE DATOS GENERALES "CERRO GRANDE"						
Compacidad relativa (%)	Humedad (%)	Peso volumétrico seco (γ_d) (kN/m ³)	Esfuerzo de Confinamiento " σ_c " (kPa)	Esfuerzo desviador "q" (kPa)	Esfuerzo cortante (τ) (kPa)	Ángulo de fricción interno (°)
75	12.1	12.0	29.4	329.9	150.2	57
	12.5	12.0	58.9	435.8	188.5	50
	11.3	12.2	117.7	704.2	293.3	46

Cerro Grande	
Esfuerzo de confinamiento (σ_3)	D _r = 75%
	Módulos (E ₅₀)
kN/m ³	kPa
29.43	38,391
58.86	44,268
117.72	49,959

4.2.3 Material de Tepexpan

En este material se realizaron pruebas triaxiales elaborando probetas con 75% de compactación relativa. Para ello, con base en la Tabla 4.19 y en la Figura 4.10, se estableció un tiempo de compactación de 9 s.

El comportamiento de este material se muestra en la Figura 4.24 y los círculos de Mohr que representan su comportamiento en la Figura 4.25.

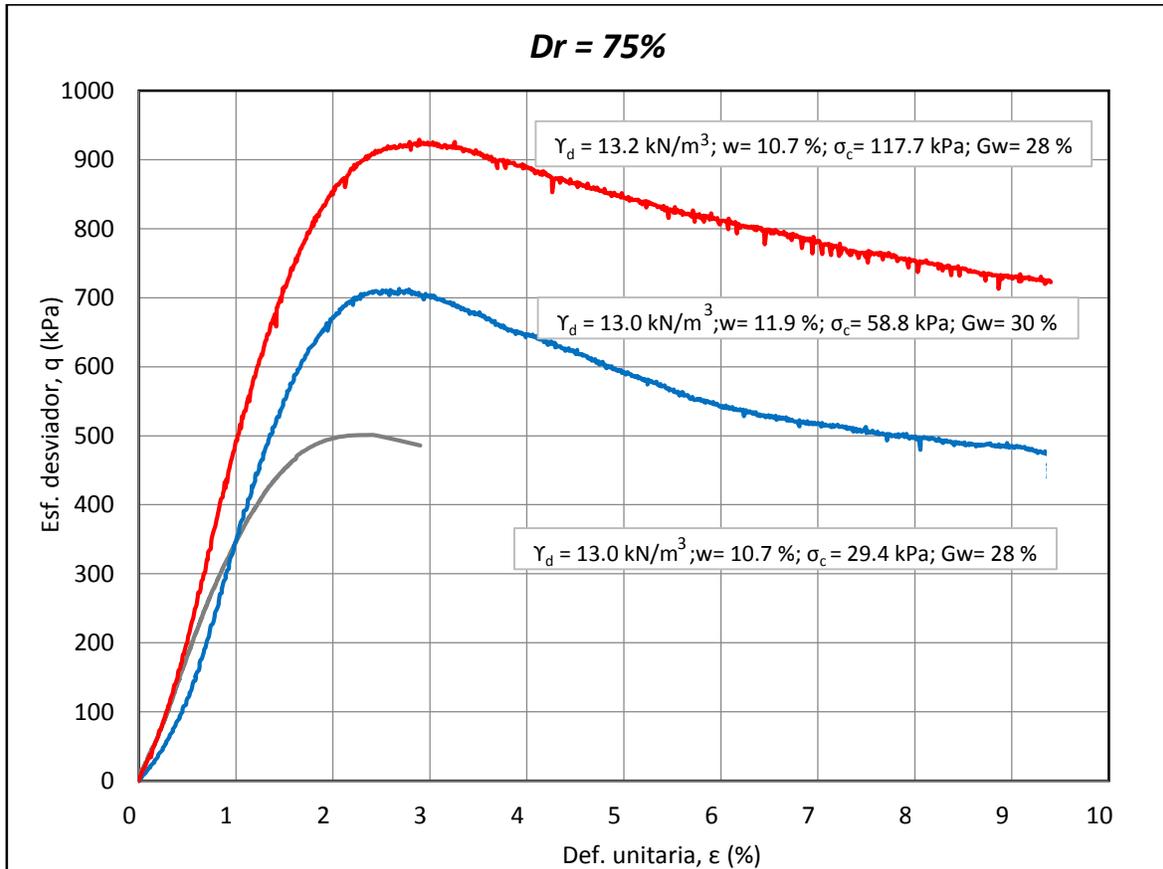


Figura 4.24 Comportamiento Esfuerzo-Deformación, Tepexpan Dr=75%

El análisis de rotura de granos luego de la prueba triaxial (ver Figura 4.26) indica que se presenta un significativo rompimiento, llegando casi a quedar la curva granulométrica fuera del rango marcado para una sub-base. El rompimiento se genera mayormente, al igual que en el material anterior, en las partículas que retiene el tamiz No. 50. A pesar de esto, si se comparan los dos análisis de rotura hechos, se concluye, nuevamente, que ésta se presenta durante el proceso de compactación y no durante la prueba triaxial.

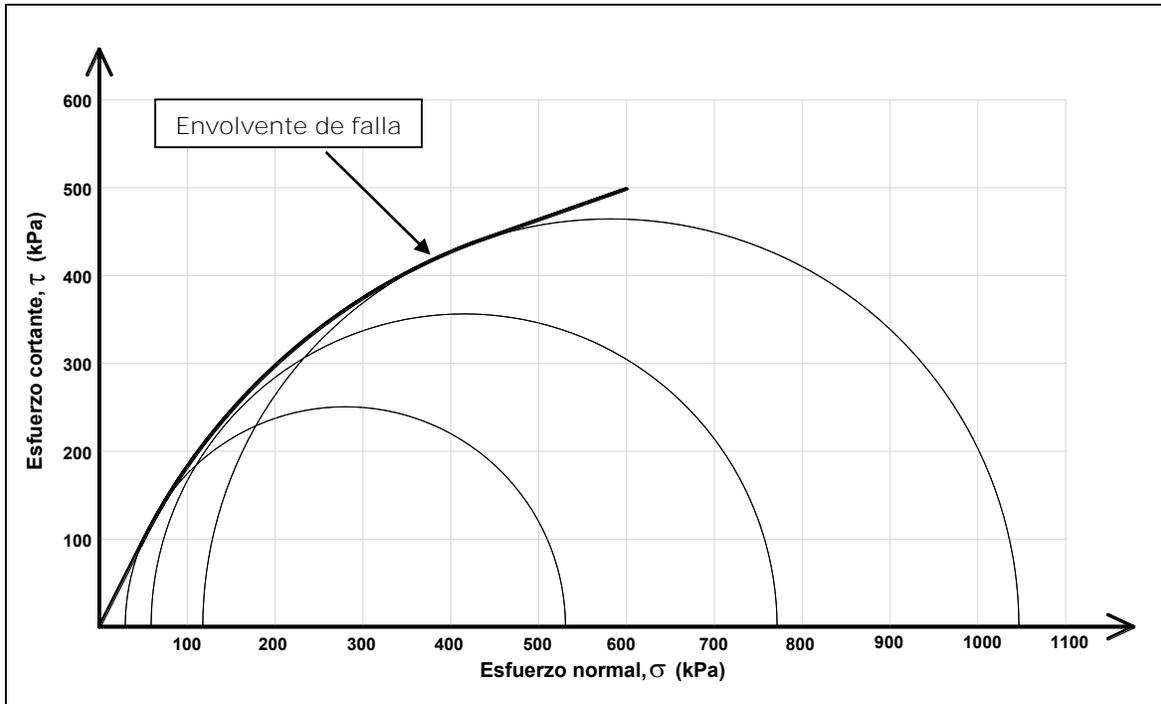


Figura 4.25. Círculos de Mohr, Tepexpan

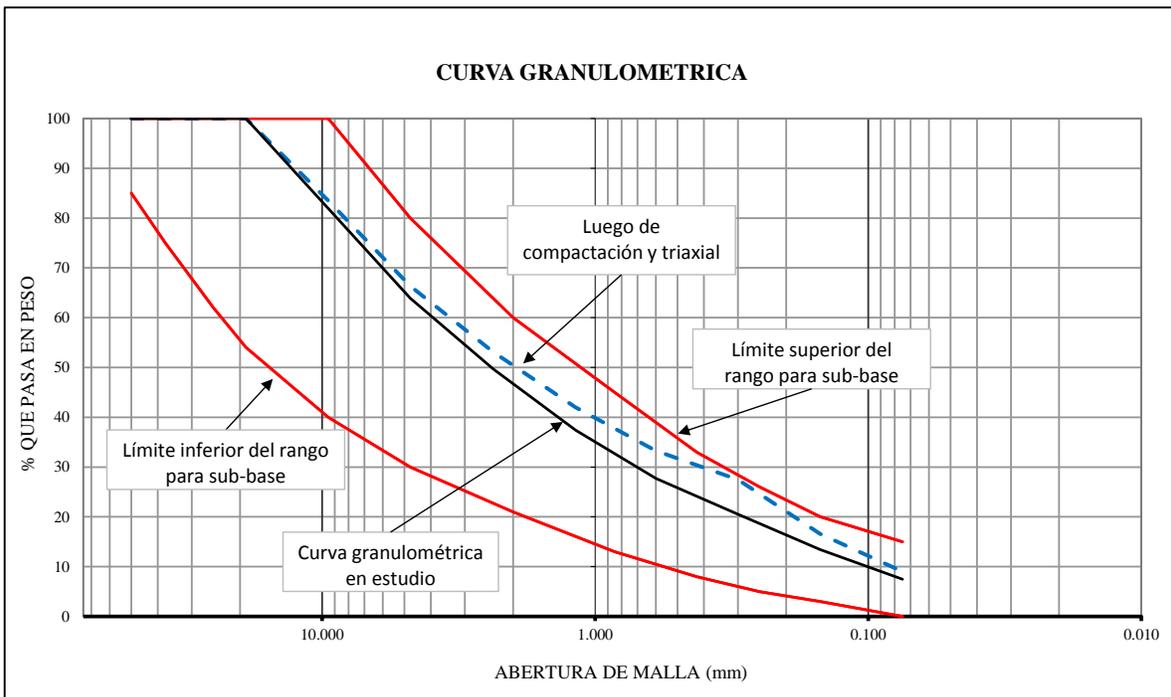


Figura 4.26. Análisis de rompimiento de partículas, Tepexpan

Los resultados de estas pruebas se muestran resumidos en la Tabla 4.26; también se muestran los módulos de deformación que se obtuvieron.

Tabla 4.26. Resultados de pruebas triaxiales, Tepexpan

TABLA DE DATOS GENERALES "TEPEXPAN"						
Compacidad relativa (%)	Humedad (%)	Peso volumétrico seco (γ_d) (kN/m ³)	Esfuerzo de Confinamiento " σ_c " (kPa)	Esfuerzo desviador "q" (kPa)	Esfuerzo cortante (τ) (kPa)	Ángulo de fricción interno (°)
75	10.8	13.0	29.4	501.1	250.6	64
	12.0	13.0	58.9	712.6	356.3	59
	10.7	13.2	117.7	929.0	464.5	53

Tepexpan	
Esfuerzo de confinamiento (σ_3)	D _r = 75%
	Módulos (E ₅₀)
kN/m ³	kPa
29.43	36,400
58.86	35,032
117.72	48,860

La Tabla 4.27 muestra resumidos los principales parámetros obtenidos de las pruebas hechas a los tres materiales.

Tabla 4.27. Resultados generales de las pruebas triaxiales

Esfuerzo de confinamiento (σ_c)	Ángulos de fricción internos "Xaltepec"			"Cerro Grande"	"Tepexpan"
	D _r = 62%	D _r = 75%	D _r = 95%	D _r = 75%	D _r = 75%
	Ángulo de fricción interno	Ángulo de fricción interno	Ángulo de fricción interno	Ángulo de fricción interno	Ángulo de fricción interno
kN/m ³	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)
29.43	59	65	70	57	64
58.86	55	63	64	50	59
117.72	51	55		46	53

Esfuerzo de confinamiento (σ_3)	Módulos de Deformabilidad "Xaltepec"			"Cerro Grande"	"Tepexpan"
	D _r = 62%	D _r = 75%	D _r = 95%	D _r = 75%	D _r = 75%
	Módulos (E ₅₀)	Módulos (E ₅₀)	Módulos (E ₅₀)	Módulos (E ₅₀)	Módulos (E ₅₀)
kN/m ³	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
29.43	22,274	37,137	50,743	38,391	36,400
58.86	28,446	48,786	86,613	44,268	35,032
117.72	38,548	86,350		49,959	48,860

4.3 Comparación de resultados de las pruebas triaxiales.

Una vez realizadas todas las pruebas se comparan los resultados de cada material ante los diferentes esfuerzos de confinamiento.

En la Figura 4.27, Figura 4.28 y Figura 4.29 se muestra el comportamiento esfuerzo-deformación que presentaron los tres materiales (con una misma compacidad relativa) para cada uno de los tres esfuerzos de confinamientos usados.

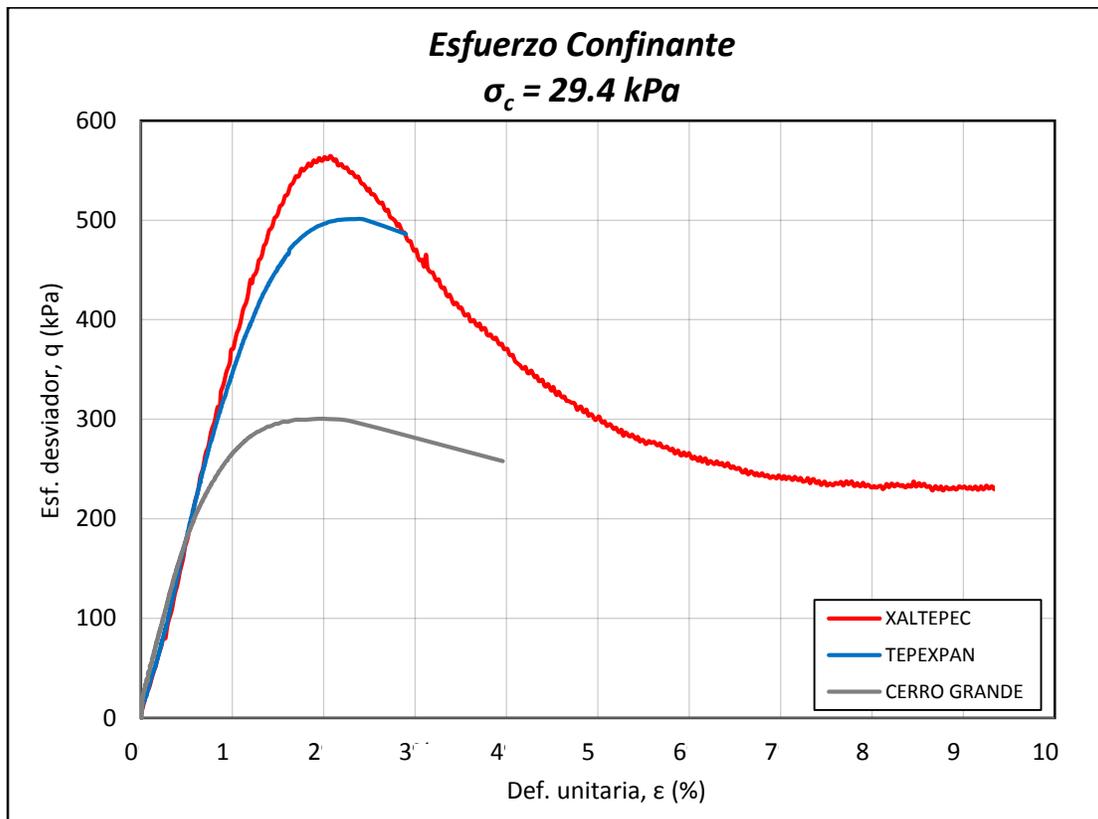


Figura 4.27. Resistencia de los tres materiales para $\sigma_c=29.4$ kPa

Con base en esto, se concluye que los tres materiales presentan una resistencia pico bien definida y que alcanzan la falla cuando se llega al 2% de la deformación unitaria. Luego de este pico existe una resistencia residual la cual podría decirse, para el material de Xaltepec, es cercana al 50% de su valor máximo o pico.

Es posible afirmar que de las tres escorias volcánicas estudiadas, aquella proveniente de Xaltepec es la que presenta siempre una mayor resistencia al esfuerzo cortante. Sin embargo, su resistencia residual es menor en todos los casos que la del material de Tepexpan.

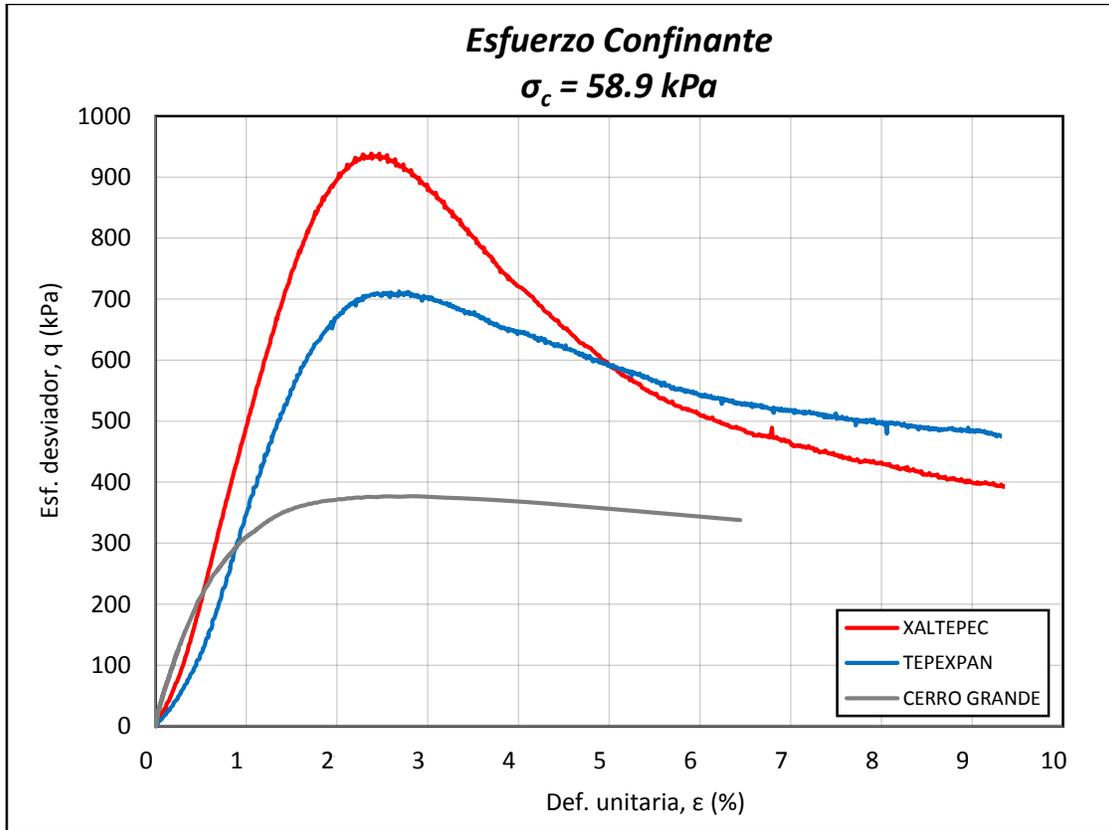


Figura 4.28. Resistencia de los tres materiales para $\sigma_c=58.9 \text{ kPa}$

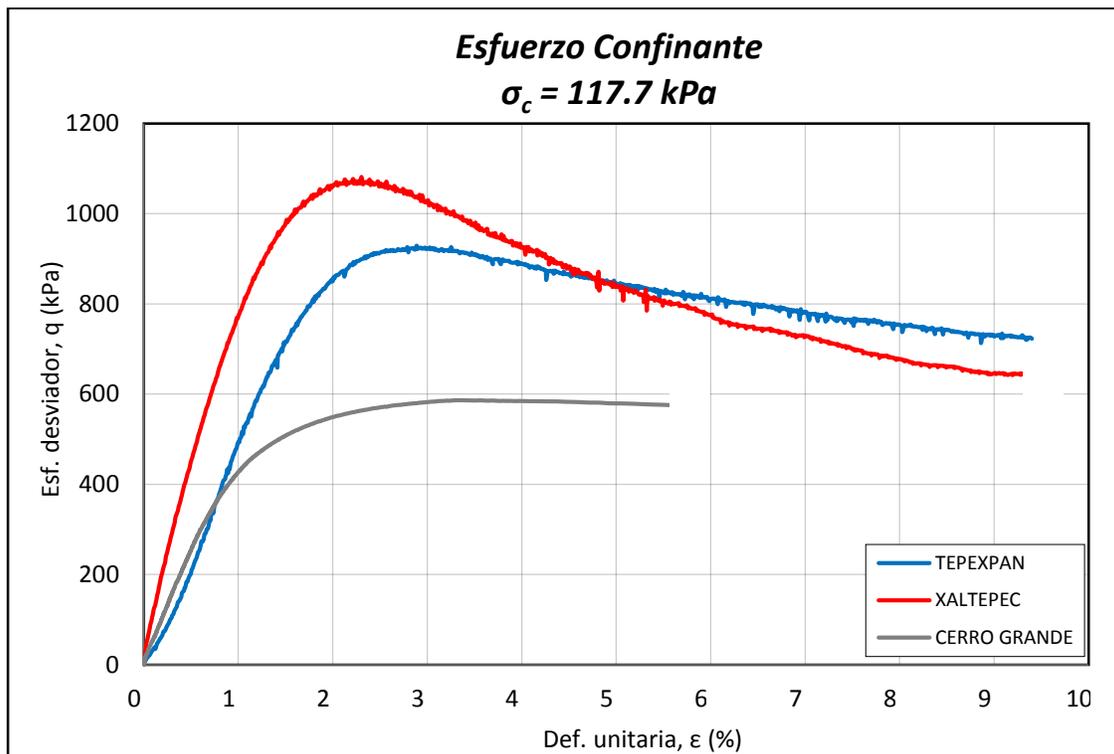


Figura 4.29. Resistencia de los tres materiales para $\sigma_c=117.1 \text{ kPa}$

De la curva esfuerzo-deformación, en las pruebas con confinamiento de 29.4 kPa, se deduce que en los tres materiales estudiados existe un comportamiento lineal similar a bajos niveles de esfuerzo normal, lo que causa poca diferencia en los módulos de deformación hallados para las tres escorias volcánicas estudiadas. Esta similitud en los módulos y por ende en el comportamiento esfuerzo-deformación, se pierde a medida que se trabaja con mayores esfuerzos confinantes.

Como se mencionó previamente, al trabajar con resistencias pico las envolventes de falla no son líneas rectas sino que se curvan al ir aumentando el confinamiento, razón por la cual el ángulo de fricción interna, para cada compacidad relativa estudiada, no es valor constante.

No sobra en este punto indicar de nuevo que la hipótesis de trabajo usada en esta investigación asume los ángulos de fricción interna como aquellos que corresponden a la recta que va del origen de coordenadas a la tangente al círculo de Mohr que se esté estudiando. Así, en la medida que prevalece la concavidad de la envolvente, el ángulo ϕ secante resulta una subestimación del ángulo verdadero; por el contrario, para la porción lineal de la envolvente, el ángulo ϕ así asumido resulta mayor al ángulo tangente a la envolvente.

En la Figura 4.30 se muestran las envolventes obtenidas para cada compacidad relativa estudiada en el material Xaltepec, se omite el trazado de los círculos para no saturar el gráfico.

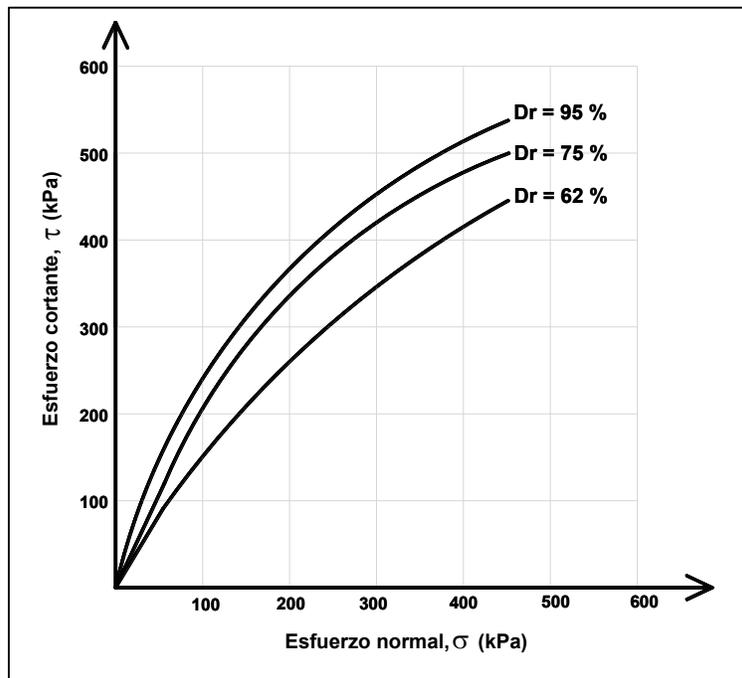


Figura 4.30. Envolventes de falla en función de la compacidad relativa

Estos resultados también se pueden expresar de la forma en que se muestra en la Tabla 4.28 y en la Figura 4.31.

Tabla 4.28. Ángulos de fricción interno, Xaltepec

Compacidad relativa (%)	Esfuerzo de Confinamiento " σ_c " (kPa)	Ángulo de fricción interno (°)
62	29.4	59
	58.9	55
	117.7	51
75	29.4	65
	58.9	63
	117.7	55
95	29.4	70
	58.9	64
	117.7	

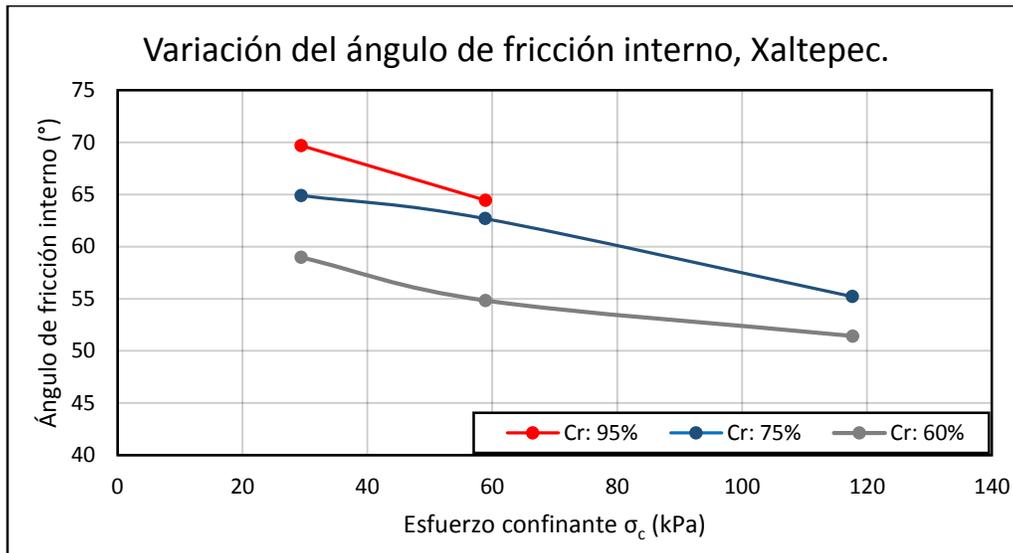


Figura 4.31. Variación del ángulo de fricción en función de la compacidad relativa

Es evidente que la compacidad relativa y el confinamiento son dos factores que juegan un papel muy importante en la resistencia del material y por ende, en los ángulos de fricción alcanzados en estas pruebas. En la Figura 4.31 se aprecian los altos valores de ángulos de fricción, así como la forma en que éstos disminuyen al aumentar el esfuerzo confinante, pero en ningún caso quedando por debajo de 50°.

Por otro lado, en la Figura 4.32 se presentan las envolventes de falla de cada material ensayado bajo una misma compacidad relativa (75%). En dicha figura se aprecia, tal y como se había mencionado, que el material proveniente de Xaltepec posee mayor resistencia que los otros dos tezontles, cabe recordar que dicho material es el que mayores pesos volumétricos alcanza. Los ángulos de fricción obtenidos en las pruebas realizadas a los tres materiales, bajo una misma compacidad, se resumen en la Tabla 4.29.

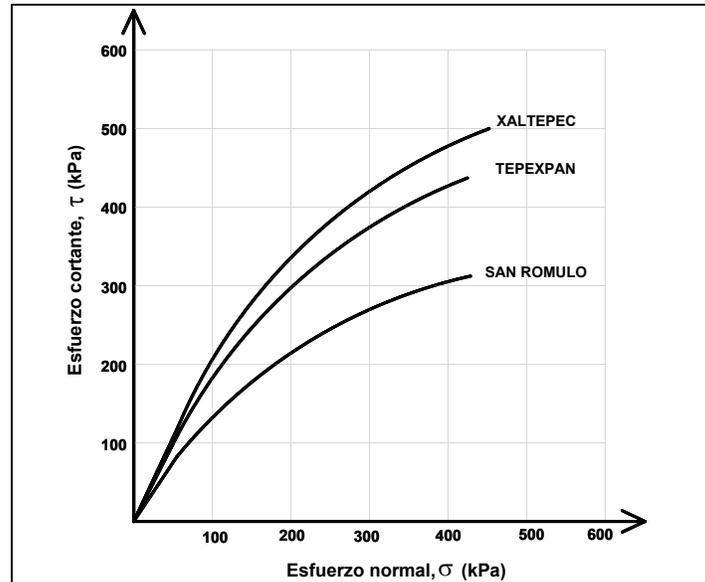


Figura 4.32. Envolventes de falla de cada material, $D_r=75\%$

Tabla 4.29. Ángulos de fricción en los tres materiales, $D_r=75\%$

$D_r = 75\%$			
Esfuerzo de Confinamiento " σ_c " (kPa)	Ángulo de fricción interno ($^\circ$)		
	Xaltepec	Cerro Grande	Tepexpan
29.4	65	57	64
58.9	63	50	59
117.7	55	46	53

Se concluye que los materiales de Xaltepec y Tepexpan presentan valores similares de ángulos de fricción interna, los cuales son, en todos los casos, mayores que los obtenidos en el material Cerro Grande. Por esta razón, si se buscara un material con buena resistencia y que fuera algo ligero, el mejor sería el proveniente de Tepexpan, ahora bien, si la ligereza del material no es problema y el que tengan altos pesos volumétricos no afecta el proyecto, sería recomendable usar el material de Xaltepec.

La Tabla 4.30 muestra los módulos de deformabilidad obtenidos en esta investigación. La Figura 4.33 presenta la variación de dichos módulos en función de los esfuerzos confinantes para las distintas compacidades usadas, esto para el material de Xaltepec. De igual forma, la Figura 4.34 muestra cómo varía este módulo en cada material, al usar una misma compacidad.

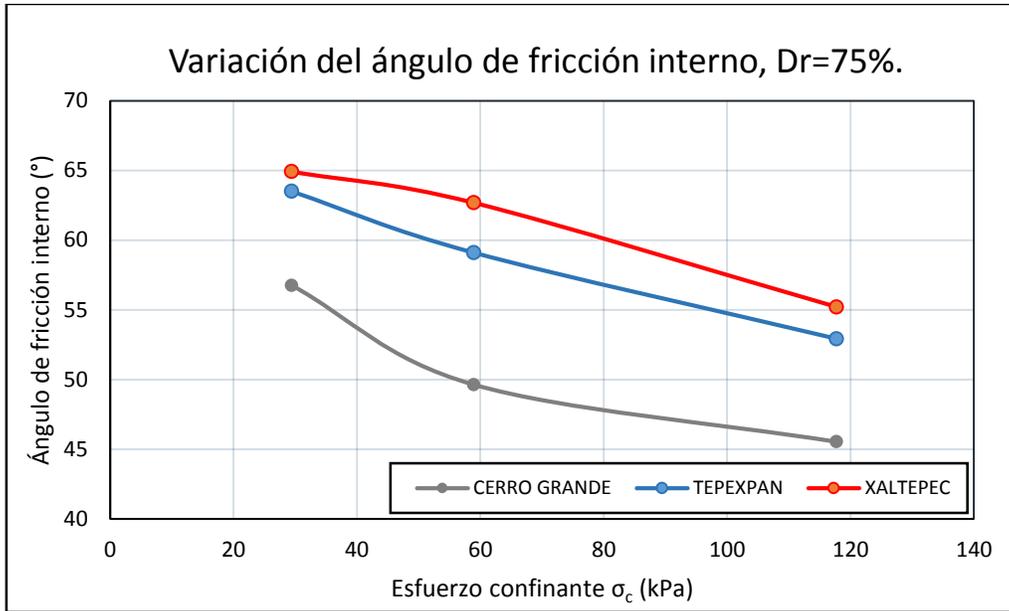


Figura 4.33. Variación del ángulo de fricción en función del material

Tabla 4.30. Resultados de Módulos de deformabilidad

Esfuerzo de confinamiento (σ_3) kN/m ³	Módulos de Deformabilidad "Xaltepec"			"Cerro Grande"	"Tepepan"
	D _r = 62%	D _r = 75%	D _r = 95%	D _r = 75%	D _r = 75%
	Módulos (E ₅₀) kPa	Módulos (E ₅₀) kPa	Módulos (E ₅₀) kPa	Módulos (E ₅₀) kPa	Módulos (E ₅₀) kPa
29.43	22,274	37,137	50,743	38,391	36,400
58.86	28,446	48,786	86,613	44,268	35,032
117.72	38,548	86,350		49,959	48,860

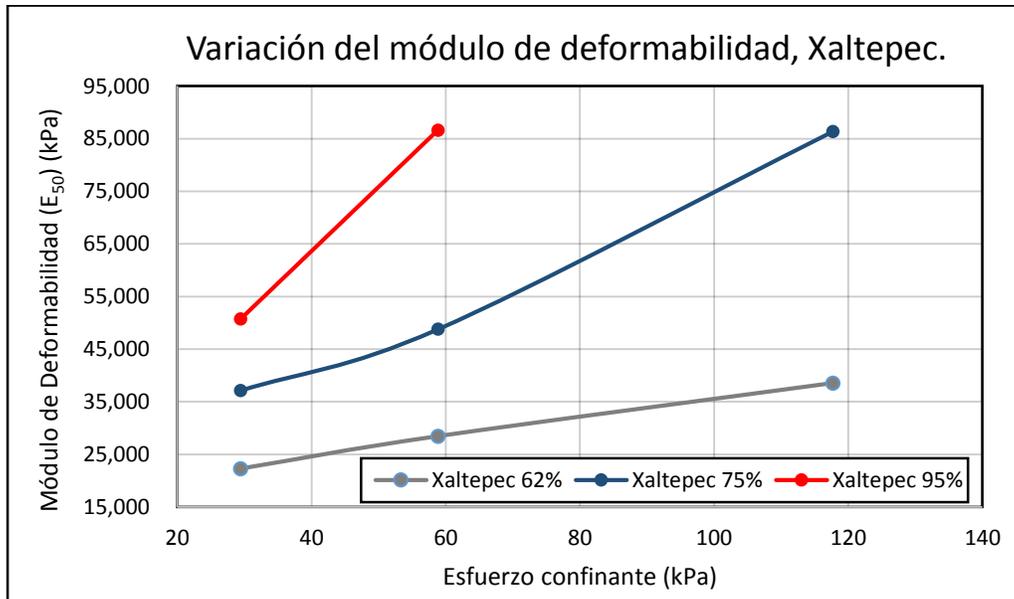


Figura 4.34. Variación del módulo de deformabilidad en función de la compactación relativa.

Se observa en el material de Xaltepec que el módulo de deformación es mayor a medida que los esfuerzos confinantes aumentan. Si se rigidiza el material, aumentando su compacidad relativa, se obtienen módulos mayores para los mismos esfuerzos confinantes. El valor mínimo que se encontró puede considerarse un buen valor teniendo en cuenta la naturaleza del material.

Al ensayar los tres materiales bajo una misma compacidad relativa (Figura 4.35) se obtienen, para las escorias provenientes de San Rómulo (Tepexpan y Cerro Grande), módulos de deformabilidad similares entre sí, sobre todo para el menor y mayor valor de esfuerzo confinante. La variación total entre estos dos valores es de alrededor de 10,000 kPa en total.

Por otro lado, el tezontle proveniente de Tepexpan presenta una gran variación entre su módulo mínimo y el máximo, cerca de 50,000 kPa. Dicho comportamiento va ligado al hecho de que esta escoria adquiere mayores pesos volumétricos y por ende se rigidiza más.

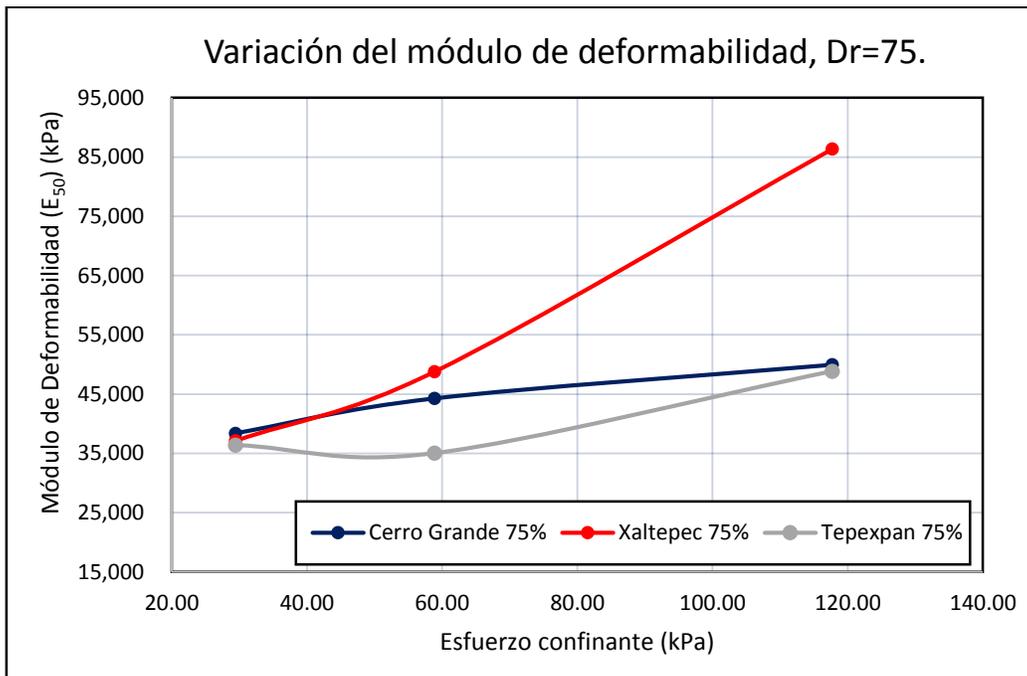


Figura 4.35. Variación del módulo de deformabilidad en función del material

Desde la Figura 4.36 a la Figura 4.45 se muestran algunas relaciones entre los parámetros más importantes que se determinaron en esta investigación, tales como ángulos de fricción internos, módulos de deformabilidad, relación de vacíos y pesos volumétricos secos; esto para el material de Xaltepec usando las distintas compacidades, así como para los tres materiales al trabajarse con una sola.

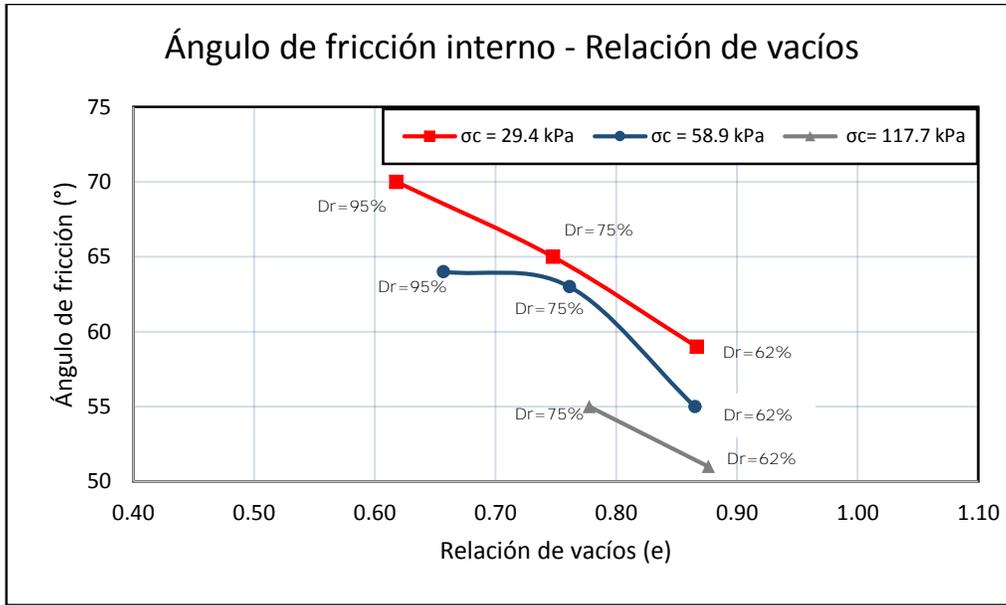


Figura 4.36. Relación entre los ángulo de fricción interno y la relación de vacíos, Xaltepec

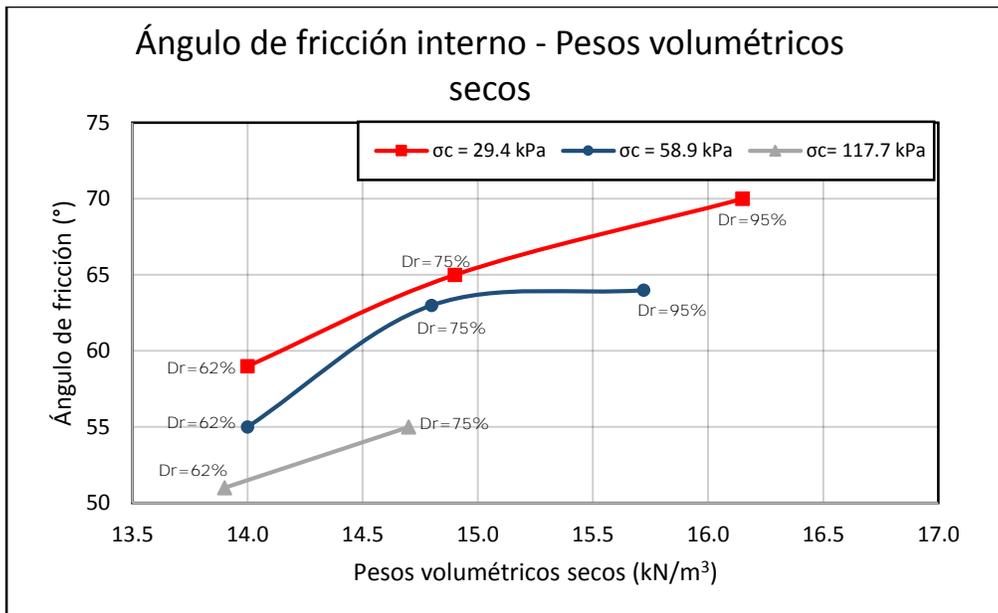


Figura 4.37. Relación entre los ángulo de fricción interno y los pesos volumétricos secos, Xaltepec

Se puede observar que al aumentar la compactación del material acomodando sus partículas, logrando que aquellas de menor tamaño llenen los espacios que quedan entre las más grandes, se genera una disminución en la relación de vacíos y por ende un aumento en su peso volumétrico, ocasionando así un incremento en la resistencia al esfuerzo cortante.

Es claro que para un mismo valor de compactación relativa, los valores más altos de ángulos de fricción interna se logran para el menor esfuerzo de confinamiento.

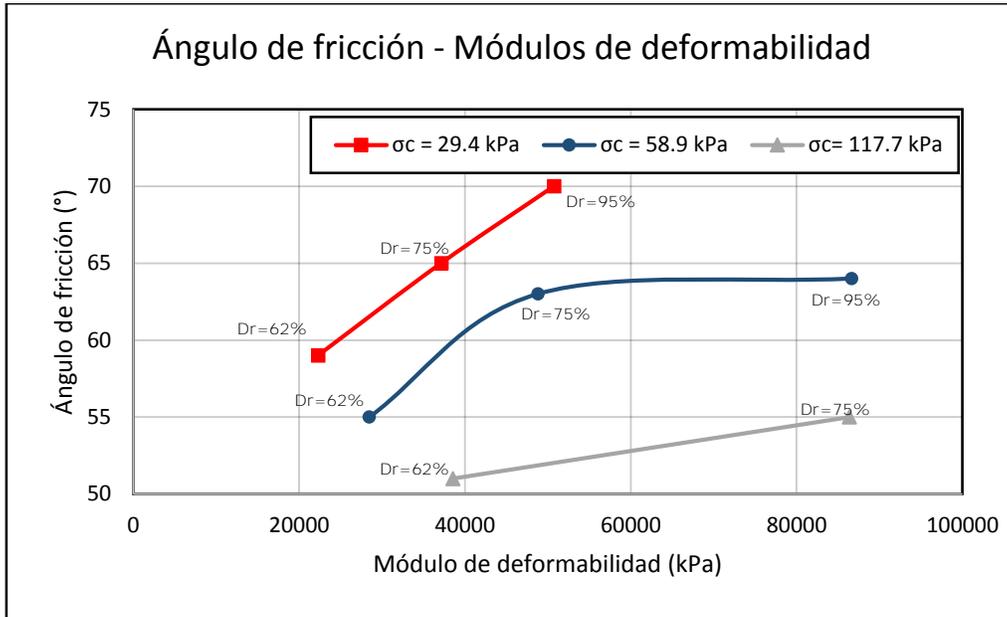


Figura 4.38. Relación entre los ángulos de fricción interna y los módulos de deformabilidad

En la Figura 4.38 se aprecia el mismo comportamiento que en las gráficas anteriores, ya que existe una ganancia de resistencia al esfuerzo cortante debido a la densificación del material, misma que se manifiesta en este caso como un incremento en los valores de módulos de deformabilidad. Lo anterior para un esfuerzo confinante, ya que también se aprecia que para una misma compactación, a mayor esfuerzo confinante y mayor módulo de deformabilidad, menor es la resistencia desarrollada.

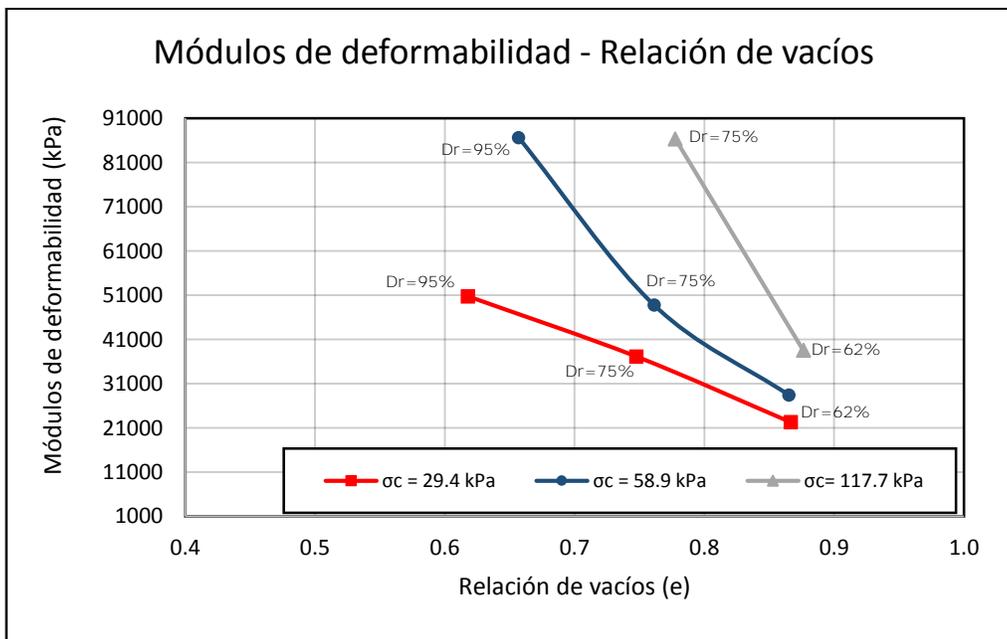


Figura 4.39. Relación entre los módulos de deformabilidad y la relación de vacíos, Xaltepec

En las Figuras 4.39 y 4.40 es posible ver nuevamente la relación directa que existe entre la disminución de la relación de vacíos, el incremento en los pesos volumétricos secos y el aumento en la rigidez de este tipo de escoria volcánica.

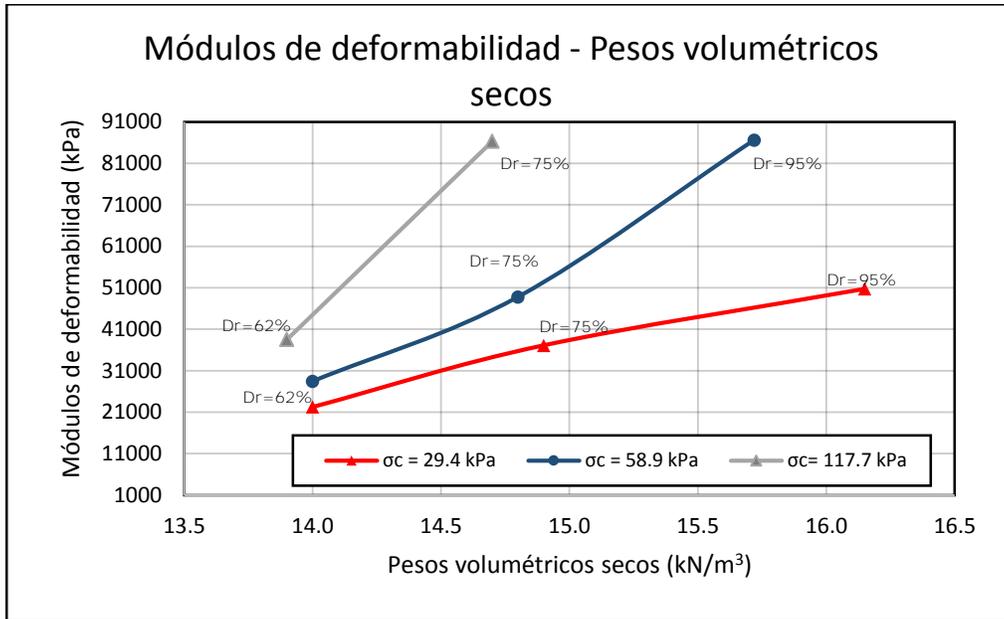


Figura 4.40. Relación entre los módulos de deformabilidad y los pesos volumétricos secos

Al comparar, como se muestra en la Figura 4.41, los resultados de las pruebas realizadas en los tres tipos de escorias volcánicas, es claro que aquellas denominadas Xaltepec y Tepexpan presentan valores similares de ángulos de fricción interna a pesar de que cuentan con pesos volumétricos muy distintos. El material de Cerro Grande presenta valores de ángulos de fricción no tan bajos con pesos volumétricos relativamente bajos.

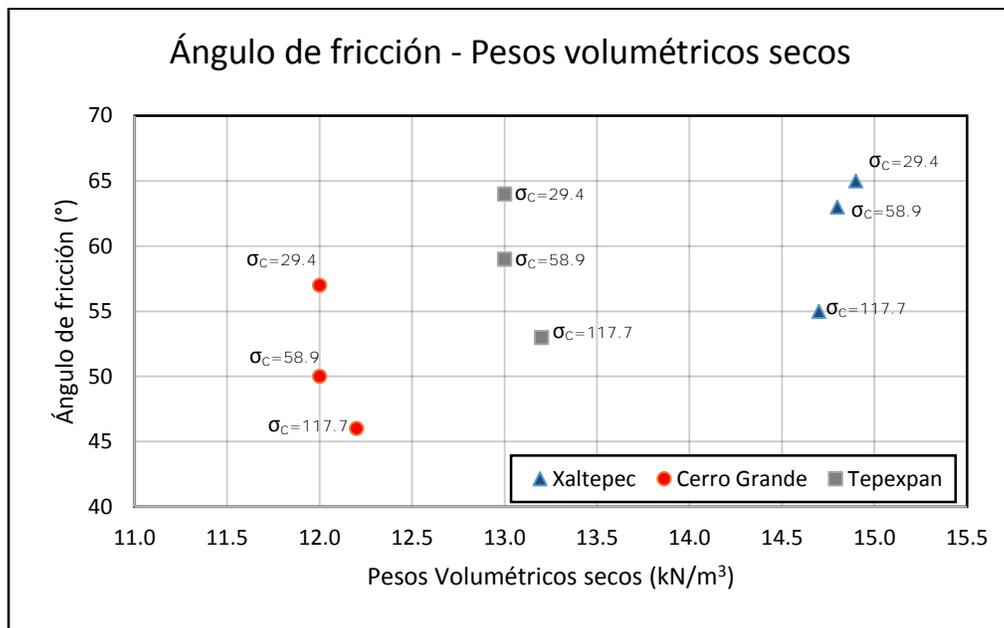


Figura 4.41. Relación entre ángulos de fricción interna y pesos volumétricos secos, $Dr = 75\%$

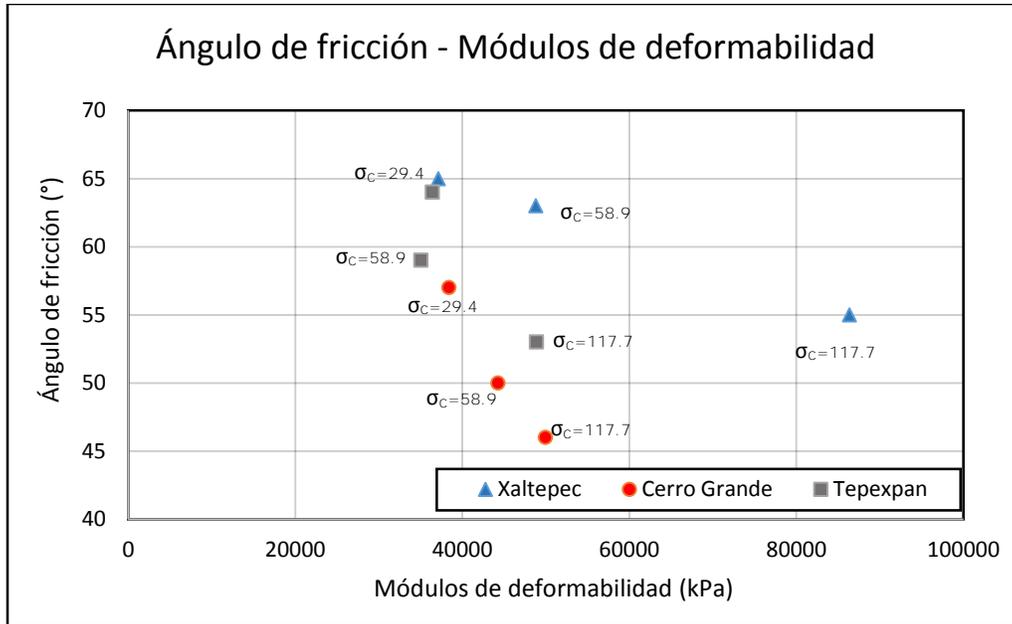


Figura 4.42. Relación entre ángulos de fricción interno y módulos de deformabilidad, $D_r=75\%$

El comportamiento que se muestra en la Figura 4.42 se había visto y comentado previamente, se aprecia claramente cómo a medida que los módulos de deformabilidad, así como los esfuerzos de confinamiento se hacen más altos, la resistencia de los materiales disminuye.

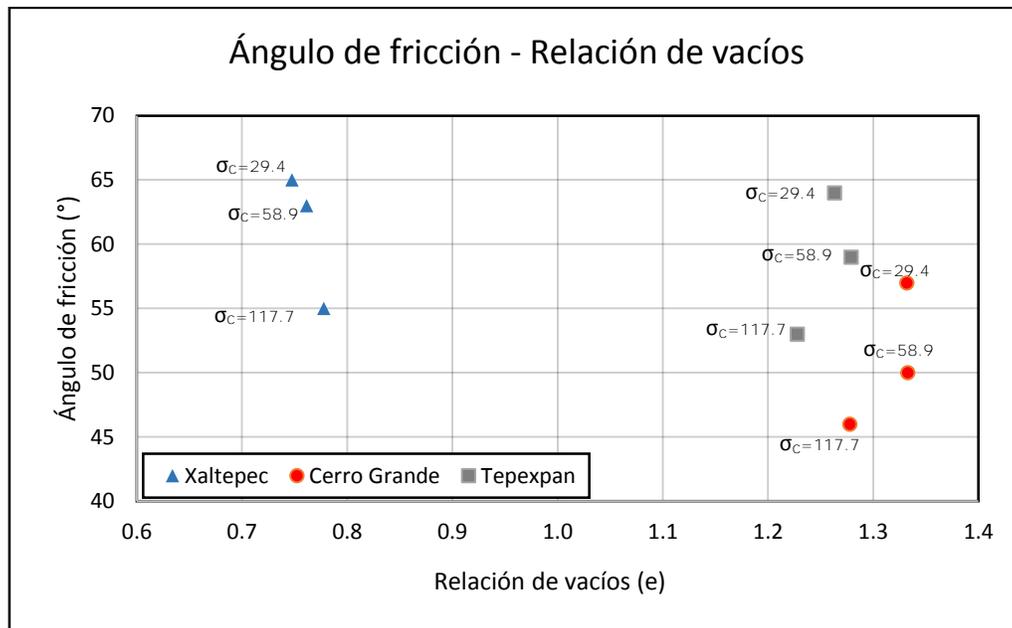


Figura 4.43. Relación entre los ángulos de fricción interno y la relación de vacíos, $D_r=75\%$

En las Figuras 4.43 y 4.44 se aprecia que la escoria volcánica de Xaltepec presenta valores menores de relación de vacíos respecto a los otros dos materiales, casi del orden del 50% de diferencia; por ende sus pesos volumétricos son siempre mayores. No obstante, esto no genera una diferencia importante en los resultados de ángulos de

fricción interna (ya que dichos ángulos son similares en el material de Tepexpan y el de Xaltepec), ni en los módulos de deformabilidad (exceptuando una sola prueba).

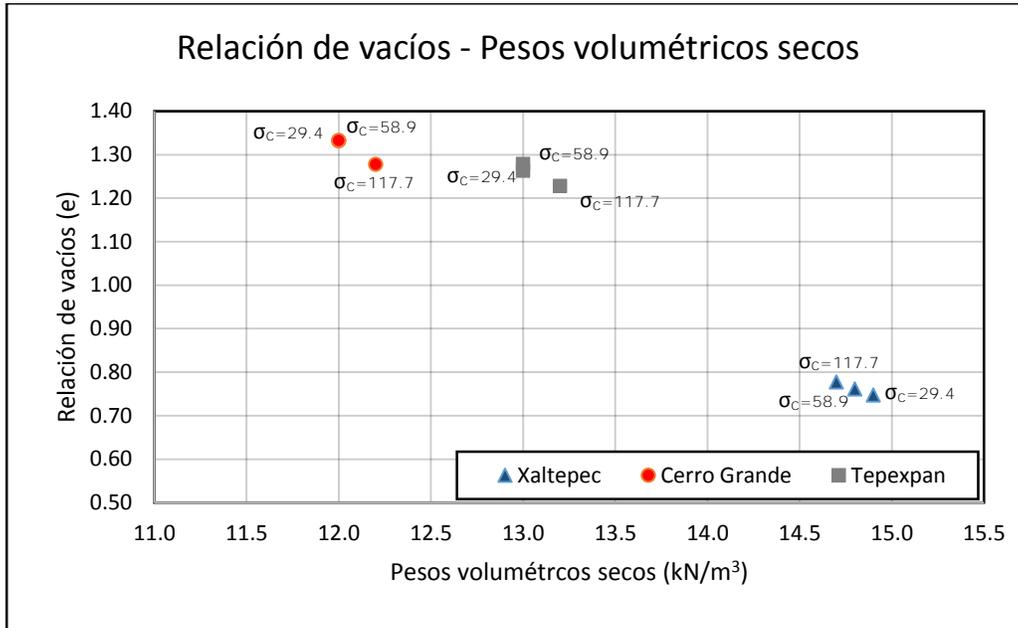


Figura 4.44. Relación entre la relación de vacíos y los pesos volumétricos secos, $D_r = 75\%$

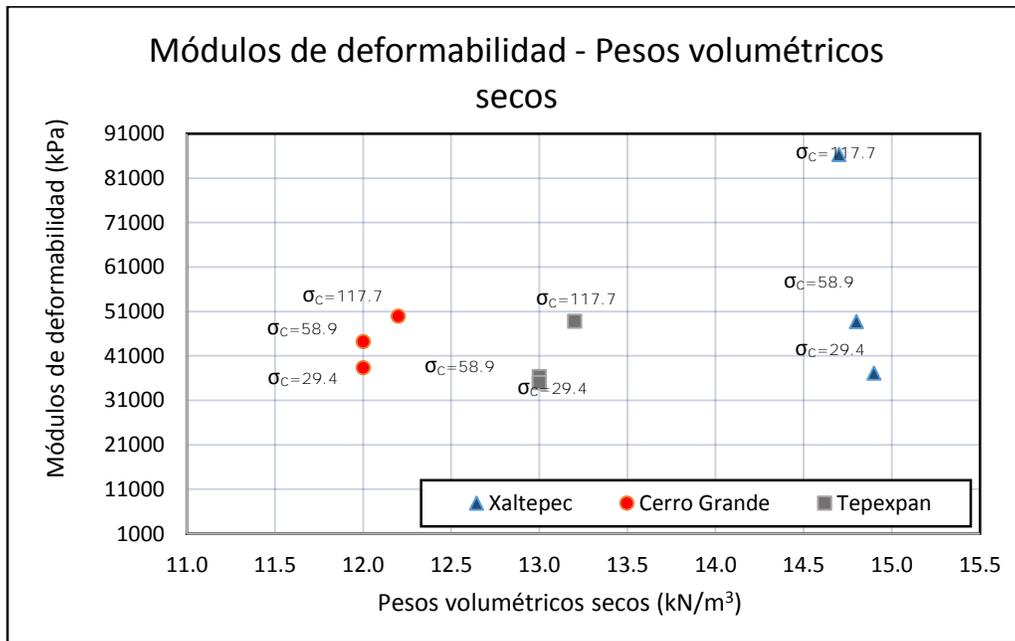


Figura 4.45. Relación entre los módulos de deformabilidad y los pesos volumétricos secos, $D_r = 75\%$

4.3.1 Determinación de ángulos de dilatancia.

Tal y como se mencionó en el sub capítulo 1.6 de este trabajo, la dilatancia de un material se pueden encontrar con base en los resultados de las distintas pruebas triaxiales desarrolladas.

En esta investigación debido a que no se monitoreó la presión de poro ni los cambios volumétricos que se iban generando, la dilatancia para este caso se determinó en función del comportamiento esfuerzo-deformación de cada ensayo realizado. Para ello se requiere generar círculos de Mohr usando las resistencias residuales y no las pico, de cada prueba, mismas que se presentan cuando se alcanza el 10% de la deformación unitaria. Una vez que se tienen dichos círculos es posible obtener una nueva envolvente de falla, la cual ahora se asemeja mucho a una línea recta, encontrando así el ángulo de fricción interna en estado crítico. Recordemos que analizando el comportamiento pico de los materiales se deduce que el ángulo de fricción se compone del ángulo de fricción en estado crítico más el ángulo de dilatancia, para un determinado valor de esfuerzo (Ver sub capítulo 1.6).

La determinación de la dilatancia se llevó a cabo en el material de Xaltepec y en el de Tepexpan, no fue posible en el tercer material debido a que para ello se requiere conocer los valores de resistencia residuales y en este último, las pruebas triaxiales se realizaron a carga controlada, por lo que los valores residuales no se conocieron con certeza.

En las Figuras 4.46, 4.47 y 4.48 se muestran los círculos de Mohr que se obtuvieron al tener en cuenta las resistencias residuales, esto para cada serie de pruebas triaxiales en el material de Xaltepec.

Para la primera serie, en la que se tiene una compacidad relativa de 62%, se aprecia claramente que la envolvente de falla en estado crítico corresponde a una línea recta con un ángulo de 47°. En las otras dos series, con compacidades de 75% y 95%, la envolvente recta se ajusta para que sea representativa del comportamiento del material en función de los círculos de Mohr, se obtiene un ángulo de 49°.

Considerando la poca diferencia entre estos dos valores, se concluye que estos resultados concuerdan con la teoría, la cual indica que debe encontrarse un valor constante, para cada material, sin importar sus compacidades.

Con base en los ángulos de fricción encontrados para este material con resistencias pico, mismos que se muestran en la Tabla 4.24, y en los valores del ángulo de fricción interna en estado crítico, es posible deducir los valores de ángulos de dilatancia para cada prueba. Estos resultados se resumen en la Tabla 4.31.

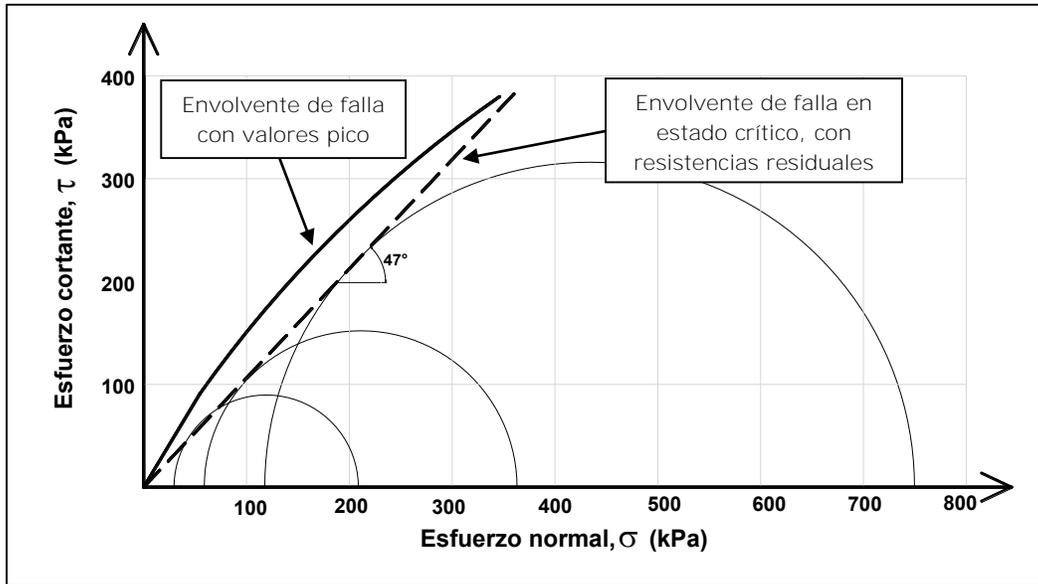


Figura 4.46. Círculos de Mohr, Xaltepec $D_r=62\%$, para determinar ángulos de dilatancia

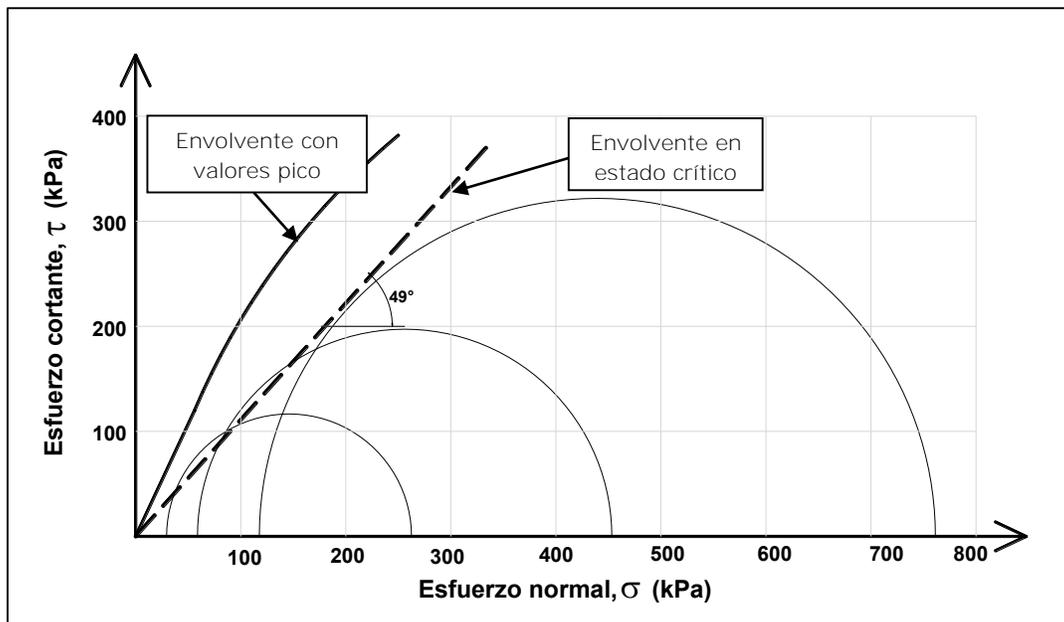


Figura 4.47. Círculos de Mohr, Xaltepec $D_r=75\%$, para determinar ángulos de dilatancia.

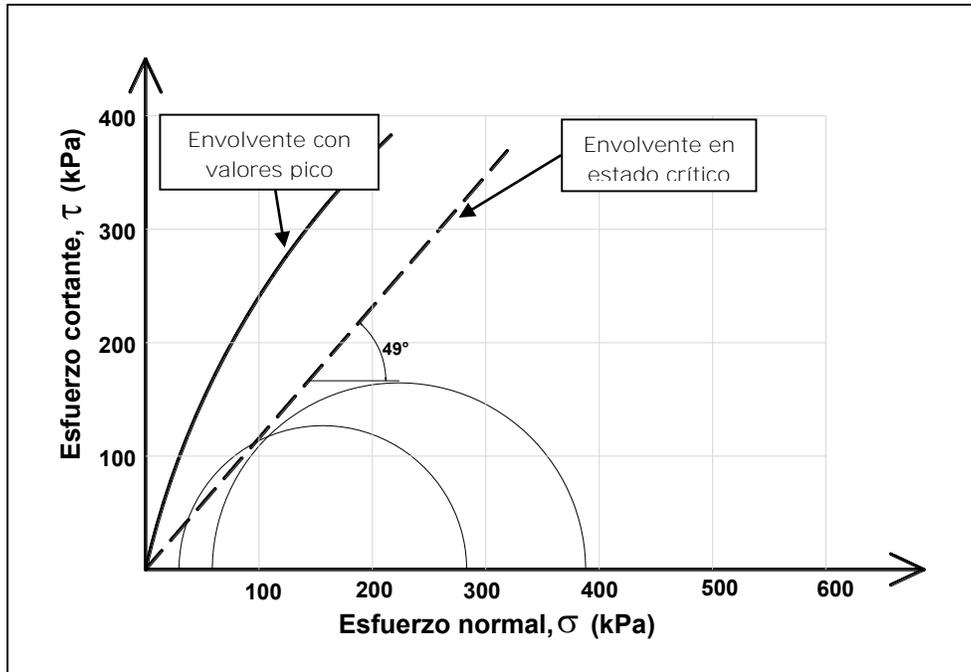


Figura 4.48. Círculos de Mohr, Xaltepec $D_r=95\%$, para determinar ángulos de dilatancia.

Tabla 4.31. Resultados de ángulos de dilatancia, Xaltepec

XALTEPEC				
Compacidad relativa (%)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Ángulos de fricción interna ($^\circ$)	Ángulos de fricción interna en estado crítico ($^\circ$)	Ángulo de dilatancia ($^\circ$)
62	29.4	59	47	12
	58.9	55		8
	117.1	51		4
75	29.4	65	49	16
	58.9	63		14
	117.1	55		6
95	29.4	70	49	21
	58.9	64		15
	117.1			

En la tabla anterior se aprecia que el mayor valor de ángulo de dilatancia encontrado es de 21° y el menor de 4° . Demostrando así que la dilatancia disminuye a medida que el esfuerzo confinante es mayor, ya que no permite que los granos se muevan unos respecto a otros.

En la literatura se menciona que estos valores de dilatancia pueden llegar a variar entre 0° y 15° (Budhu, 2011).

En la Figura 4.49 se muestran los círculos de Mohr obtenidos para el material de Tepexpan, así como la envolvente de falla con las resistencias residuales y con las pico.

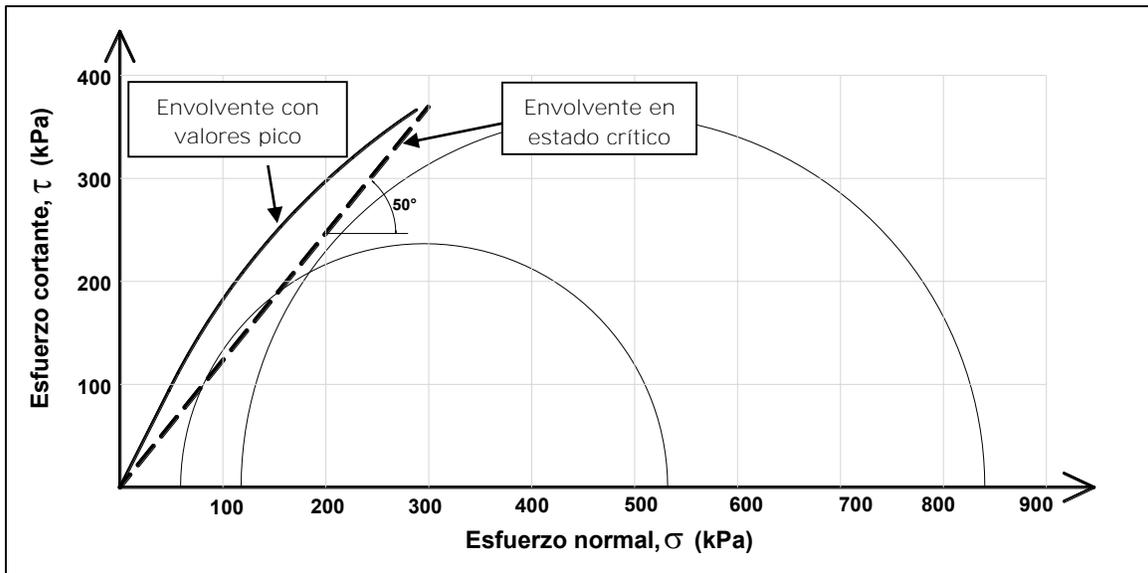


Figura 4.49. Círculos de Mohr, Tepexpan $D_r=75\%$, para determinar ángulos de dilatancia

El valor encontrado del ángulo de la envolvente de falla es de 50° , solo un grado mayor que el valor hallado para el material de Xaltepec.

Tabla 4.32. Resultados de ángulos de dilatancia, Tepexpan

TEPEXPAN				
Compacidad relativa (%)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Ángulos de fricción interna ($^\circ$)	Ángulos de fricción interna en estado crítico ($^\circ$)	Ángulo de dilatancia ($^\circ$)
75	29.4	64	50	14
	58.9	59		9
	117.1	53		3

Los ángulos de dilatancia encontrados para este material son menores a 15° , lo que concuerda con el rango propuesto en la literatura.

Vale la pena mencionar que las envolventes en estado crítico para las series de 75% y 95% de compacidad del material Xaltepec, y de 75% del de Tepexpan, no son perfectamente rectas tangentes a los círculos, sin embargo sí representan el comportamiento de dichos materiales. Por otro lado, si estas envolventes se trazaran desde el origen al círculo que representa la prueba con mayor esfuerzo confinante de cada serie, en todos los casos se obtiene un valor de 47° .

En todas las pruebas realizadas se apreció que al llevar las probetas a la falla se genera una cuña de forma triangular que trata de ir penetrando la misma probeta, lo que hace que se genere el plano de falla que se muestra en Figura 4.50.

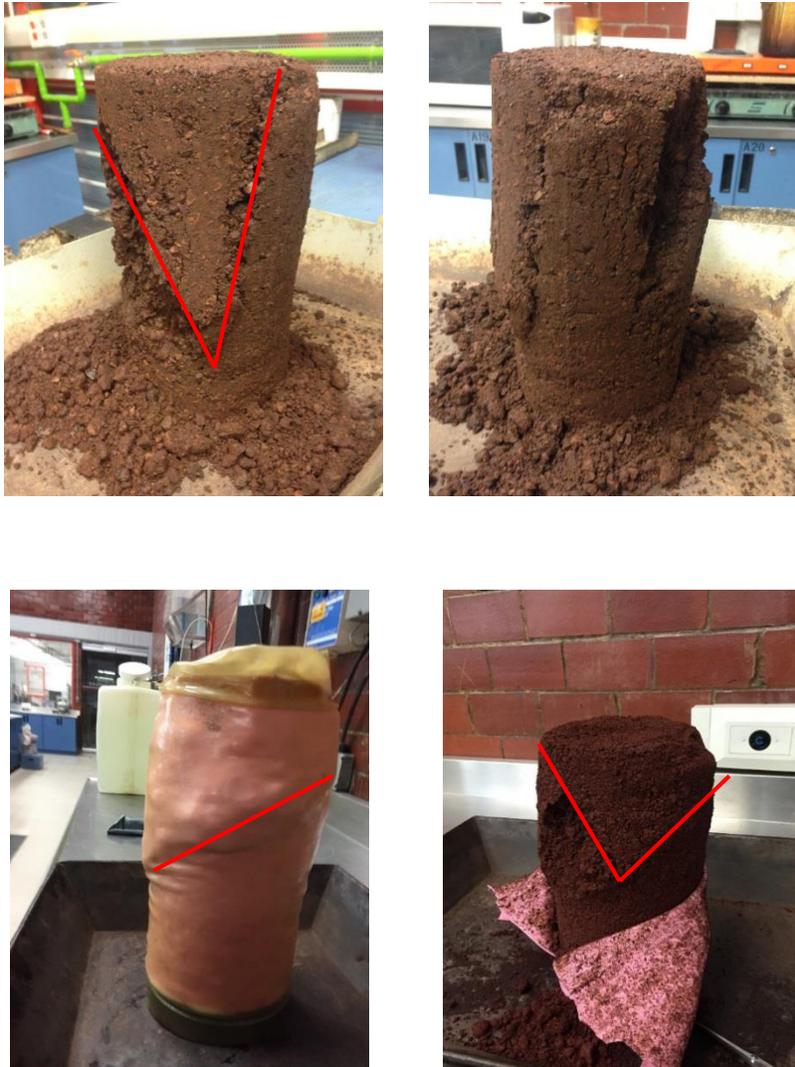


Figura 4.50. Planos de falla de la probeta

En algunas probetas se observó que dicho mecanismo de falla no se alcanzó a generar por completo y que al momento de la falla, apenas se estaban empezando a definir los planos de dicha cuña. Esto se ve reflejado con un ensanchamiento en la parte superior de la muestra (Figura 4.51).



Figura 4.51. Ensanchamiento de la probeta

En la prueba con compactación del 95% del material Xaltepec, con $\sigma_c=117.7$ kPa la cual no concluyó por falta de capacidad de la celda, fue posible extraer la probeta de la cámara triaxial para hacer un análisis visual de la deformación que ésta alcanzó. Se encontró que no presentó deformaciones radiales (Ver Figura 4.52). Al partir dicha probeta a la mitad, fue posible ver el entramado de granos que se logra con la compactación (Ver Figura 4.53).



Figura 4.52. Probeta sin deformaciones radiales. Prueba Cr=95%, $\sigma_c=1.2 \text{ kg/cm}^2$



Figura 4.53. Entramado de partículas al ser compactadas

5. CONCLUSIONES

- ✓ Los resultados de las pruebas de equivalente de arena muestran que en este material existe una pequeña porción de materiales finos, mismos que presentan una plasticidad nula ya que se descarta que posean material arcilloso. Debido a esto, para poder determinar el límite líquido de estos materiales fue necesario usar el método del Cono Sueco ya que con el método tradicional no se lograron resultados coherentes. Las pruebas demostraron que tanto el material de Xaltepec como el de Tepexpan se encuentran dentro de los valores aceptados por la normativa SCT (N-CTM-4-02-001/11) para materiales que pudieran ser usados como sub-base dentro de la estructura de un pavimento flexible, ya que ésta exige valores de límites líquidos menores a 25%. Por otro lado, dicha normativa exige valores de equivalente de arena mayores de 40, las tres escorias volcánicas estudiadas se encuentra muy por encima de dicho valor.
- ✓ El porcentaje de desgaste en la máquina de Los Ángeles del Tezontle proveniente de Xaltepec (16.5%), demuestra que este material tiene una alta resistencia a la abrasión. Lo anterior debido a que algunos de sus granos cuentan con muy baja porosidad, los cuales podrían, en dado caso, considerarse como gravas basálticas; esto permite que dicho material alcance altos pesos volumétricos. Por otro lado, el material proveniente de San Rómulo tiene valores de desgaste mucho más altos, cercanos a 30%, casi al límite de lo que la normativa permite para una sub-base.
- ✓ De las pruebas de permeabilidad de carga constante realizadas en el permeámetro de grandes dimensiones construido para esta investigación, se concluye que los dos tipos de escoria volcánica tienen una permeabilidad del orden de 3.5×10^{-1} cm/s, lo que coincide con información bibliográfica recopilada. La alta permeabilidad de estos tezontles está determinada por el prácticamente inexistente porcentaje de finos; de requerirse esta alta permeabilidad en los tezontles para obras donde se necesite algún tipo de drenaje, la clave entonces es verificar que no incluyan finos (tamaños menores a la abertura de la malla No. 200). Los resultados muestran también que al crecer el gradiente hidráulico, la velocidad de flujo deja de guardar proporcionalidad con el gradiente hidráulico; o dicho de otra forma, que empieza a no cumplirse la ecuación de Darcy, que asume un flujo laminar.
- ✓ La compactación usada en esta investigación fue dinámica ya que se constató que es la que menor rotura de granos causa en el material y que es la más eficiente para compactar estos tezontles. Con base en algunas pruebas realizadas, es posible concluir que densificar estos materiales mediante impacto genera gran rotura de granos.
- ✓ En las pruebas de compactación se evidenció que la escoria volcánica es un material que gana rigidez y aumenta su peso volumétrico con gran facilidad, ya que al compactarse por pocos segundos alcanza un alto porcentaje de su compacidad relativa máxima. En la práctica, esto es una ventaja si se quiere compactar estas escorias con poca energía de compactación. Por otro lado, si lo que se desea es conseguir un material ligero, para rellenos por ejemplo, dicha característica dificulta que ello se consiga ya que en campo el tránsito vehicular durante la construcción densifica el material.

- ✓ Se pudo constatar que al compactar el material proveniente de Xaltepec, estando seco, se presenta gran rotura de granos, misma que se elimina casi por completo cuando se tiene el material húmedo. En los materiales provenientes de la mina San Rómulo fue posible observar un rompimiento de granos muy específico entre las mallas No. 30 y 100.
- ✓ Determinando las compacidades máximas y mínimas de los tres materiales, se evidenció que existe una gran gama de valores de pesos volumétricos que éstos pueden alcanzar, todo depende de con cual tezontle se esté trabajando; experimentalmente se obtuvieron valores que van desde los 9 kN/m³ hasta los 19 kN/m³. El material de Xaltepec es el que presenta mayores valores, su poca porosidad y su alta resistencia a la abrasión hacen que sea el material más pesado de los acá estudiados.
- ✓ El material de Xaltepec, debido a los altos pesos volumétricos que alcanza, los cuales son francamente valores altos para tezontles, podría ser usado como un material de precarga cuando se quiera pre consolidar un terreno , ya que su peso propio podría producir las presiones requeridas con volúmenes reducidos.
- ✓ En todas las pruebas triaxiales realizadas se aprecia un comportamiento frágil de la escoria volcánica compactada, con una marcada resistencia pico y una residual.
- ✓ Las envolventes de falla para este tipo de material resulta ser, no líneas rectas, sino líneas que se curvan a medida que aumenta el confinamiento, lo anterior debido a ángulo de dilatación de los materiales ensayados. Lo anterior causa que no se tenga un valor constante de ángulo de fricción.
- ✓ Los valores de ángulos de fricción obtenidos en las pruebas aumentan a medida que también lo hace la compacidad y disminuyen al aumentar el confinamiento. Se sabe que hay otros factores que intervienen en la resistencia de estos materiales, pero dichos factores no se controlaron en esta investigación. Para el material de Xaltepec, y con varias compacidades, se encontraron valores altos de resistencia, alcanzando ángulos de fricción de 51° al usar la compacidad más baja y de 70° cuando se compactó el material.
- ✓ De las pruebas realizadas a los tres materiales con una misma compacidad, se concluye que la resistencia pico del material Xaltepec es siempre mayor que la de los otros materiales, sin embargo la resistencia residual de Tepexpan es mayor en todas las pruebas. No obstante, los ángulos de fricción internos obtenidos para estos dos materiales, con distintos esfuerzos confinantes, son muy similares, razón por la cual podría afirmarse que el comportamiento de ambos es parecido y que si se desea encontrar un material con buena resistencia y que sea algo ligero, el material de Tepexpan es el ideal, ahora bien, si el peso del material no es problema, Xaltepec es la mejor solución.
- ✓ Se pudo apreciar que las envolventes de falla, encontradas con base en los círculos de Mohr obtenidos con las resistencias residuales (aquellas que se presentan al 10% de la deformación unitaria), se asemejan bastante a una línea recta, tal y como lo menciona la bibliografía, y que los ángulos de dichas envolventes son, para todo fin práctico, iguales, ya que la variación entre ellas es de un par de grados. Esto permite la determinación de los ángulos de dilatación que se presentaron en las distintas pruebas triaxiales, mismos que para esta investigación variaron entre 4° y 21°.

- ✓ La escoria volcánica proveniente de Cerro Grande es la que presenta menores pesos volumétricos, menores resistencias al esfuerzo cortante, mayor valor de límite líquido y mayor desgaste en la máquina de Los Ángeles.
- ✓ En los materiales provenientes de San Rómulo el módulo de deformación no sufre un gran cambio a medida que aumenta el esfuerzo confinante. Caso contrario es el material de Xaltepec, donde se pudo constatar que dicho módulo aumenta a casi el doble con el aumento del confinamiento, lo anterior para cada compacidad ensayada.
- ✓ Durante la falla, en algunas probetas se genera una cuña triangular que va penetrando en la muestra ensayada, esto causa un ensanchamiento en la parte superior de la probeta, como se mostró en algunas fotografías. En algunos casos no se alcanzó a generar por completo dicha cuña, por lo que solo se apreció el ensanchamiento en la parte superior.
- ✓ La rotura de granos en los tres materiales se presenta, mayormente, durante la compactación y no durante la prueba triaxial. Es posible que sí ocurra una degradación del material en bandas en las que se desarrolla mayor distorsión generando así la falla.
- ✓ La escoria volcánica compactada es un material que presenta buenas condiciones de resistencia y al tener valores altos de ángulo de fricción interno facilita la generación de arqueo si se usa en el cuerpo de un terraplén, transmitiendo las cargas de forma adecuada hacia los elementos diseñados para recibirlas, esto se ha podido comprobar físicamente con mediciones reales.
- ✓ Usualmente se piensa en el tezontle para su uso en la búsqueda de un material de relleno ligero. De los resultados mostrados aquí llama entonces la atención, por una parte, que haya variedades de tezontle francamente pesados; y por otra, que se densifiquen estos materiales con gran facilidad y con baja energía de compactación. Esta última característica la exhiben por igual, tezontles ligeros y tezontles pesados; en los primeros entonces, sus procedimientos de tendido y colocación resultan decisivos si lo que se busca es un relleno de bajo peso volumétrico total.
- ✓ Con base en las pruebas aquí realizadas y la experiencia ganada con éstas, es posible afirmar que el tezontle es un material muy heterogéneo y que las propiedades pueden variar significativamente de un tipo de escoria a otro, por tal razón es recomendable estudiar todos los tipos de material que se vayan a usar en un determinado proyecto.
- ✓ Debido a que se trabaja con un material granular y la forma en que éste se compacta, la elaboración de la probeta para la prueba triaxial se debe hacer siguiendo un procedimiento cuidadoso y detallado ya que la membrana puede llegar a romperse fácilmente.
- ✓ Dentro de las actividades previas a las pruebas de laboratorio, el cribado del material y la separación de éste por tamaños es la labor que más tiempo requirió ya que hasta no contar con todo el material necesario para realizar todas las pruebas, no se dio inicio a éstas.
- ✓ La labor de visitar los bancos de materiales, seleccionar cuáles de ellos son los más relevantes, realizar el muestro de los diferentes tipos de tezontle y el

transporte de éstos al Instituto de Ingeniería de la UNAM fue una labor que requirió de tiempo, esfuerzo y dedicación, no solo del autor de este trabajo sino de todo un grupo de trabajo.

6. BIBLIOGRAFÍA

Budhu, M (2011). "Soil Mechanics and Foundatios" 3er Edition.

Chávez, C (1996). "Rotura de partículas en materiales granulares". Tesis de Maestría UACH, México.

Flores, O (2008). "Módulos de rigidez y relación de Poisson dinámicos obtenidos de mediciones en la franja del tercio medio de probetas de suelo granular". Tesis doctoral Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ibarra, E (2013). "Transferencia de carga axial por fricción de pilas coladas *in situ* al sub suelo granular". Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Lee, K. L., y Farhoomand, I. (1967). "Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 4 No (1).

Marsal, R. J (1971). "Suelos granulares: modelo estadístico teoría de falla y relaciones esfuerzo-deformación". Series del Instituto de Ingeniería 290, UNAM.

Marsal, R. J (1972). "Resistencia y compresibilidad de enrocamientos y gravas". Series del Instituto de Ingeniería 306, UNAM.

Marsal, R. J (1973). "Mechanical Properties of Rockfill, Embankment Dam Engineering". Casagrande Volume, John Wiley & Sons.

Martínez, D (2009). "Caracterización y comportamiento mecánico de tezontle para su utilización en la capa de base". Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

McIntyre, D. S. (1974), "Pore-Space and Aeration Determinations," In: Loveday J. (ed.), Methods for analysis of irrigated soils (CAB/CSIRO Technical Communication no. 54), CAB, Wallingford, UK.

Mendoza, M (1992). "Determinación del contenido de agua de suelos con secado en horno microondas y límite líquido de suelos con el Cono Sueco", informe 463 del I DE I-UNAM.

N-CTM-4-02-002/11 (2011). Características de los materiales. Materiales para pavimentos. Materiales para Sub base y Base. Materiales para Sub base. SCT (Secretaria de Caminos y Transporte).

N-MMP-1-04-03 (2003). Determinación de contenido de agua en suelos. SCT (Secretaria de Caminos y Transporte).

N-MMP-1-04-006/02 (2002). Desgaste mediante la Prueba de Los Ángeles de materiales Pétreos. SCT (Secretaria de Caminos y Transporte).

N-MMP-4-04-006/02 (2002). Desgaste mediante la Prueba de Los Ángeles de materiales Pétreos. SCT (Secretaría de Caminos y Transporte).

Padilla, E (2013). "Comportamiento de un pavimento de larga duración con un diseño no convencional".

Rico, A. (2003). "La ingeniería de suelos en las Vías Terrestres, Ferrocarriles y Aeropistas".

Roberts, J. E., y De Souza, J. M. (1958). "The compressibility of sands". Massachusetts Institute of Technology.

Rodríguez, L (2011) "La práctica constructiva en la ciudad de México. El caso del tezontle, siglos XVIII-XIX". Boletín de monumentos históricos. Tercera época, Num 22.

Samaniego-Martinez, D., *et al*, (2005). "Particle density of volcanic scoria determined by water pycnometry".

Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL (2011). "Atlas de riesgos naturales de la delegación Iztapala, México, D.F."

Sowers, G., Williams, R., *et al*, (1965). "Compressibility of broken rock and settlement of rockfills. Proc. 6th ICSMFE, Montreal.

Terzaghi, K. (1960). "Discussion on Salt Springs and Lower Bear River dams." Trans. ASCE 125 (2).

Verdugo, R y De la Hoz, K (2005). "Caracterización geomecánica de suelos granulares gruesos".

Vallejo, L. Lobo, S y Seminsky, L (2014). "The Shear Strength of Sand-Gravel Mixtures: Laboratory and Theoretical Analysis". Geo-Congress 2014 Technical Papers, GSP 234.

7.1 Resultados de límites líquidos

A continuación se muestran los resultados de penetración del cono Sueco y la determinación de los valores de límites líquidos para los materiales Cerro Grande y Tepexpan.

Tabla 7.1. Resultados de penetración del Cono Sueco, Cerro Grande

Penetración (mm)	Humedad (%)
3	34.5
4.8	35.3
8	37.0
16	41.2
13.5	40.2
10.5	37.2

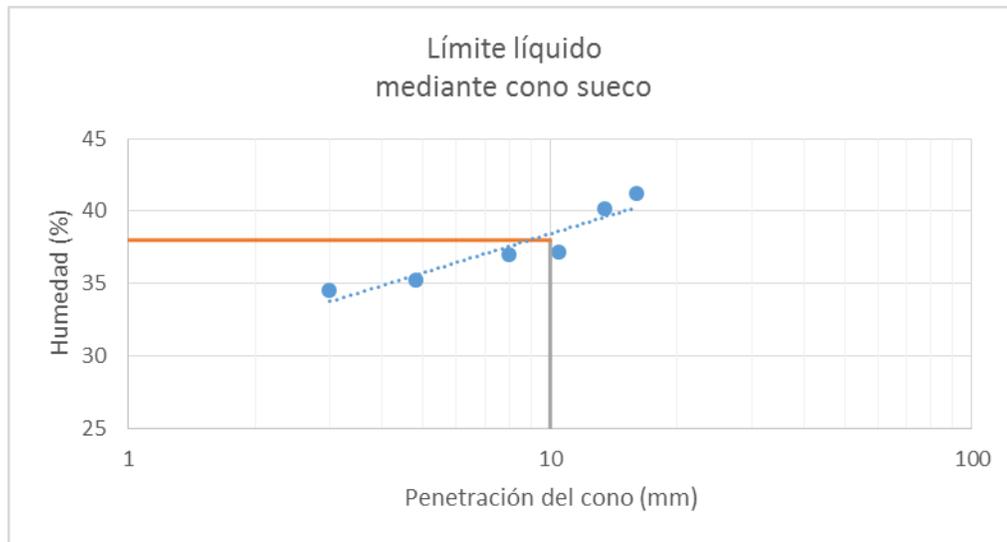


Figura 7.1. Determinación de límite líquido, Cerro Grande

W_L cono (%)	38
W_L copa (%)	36.1

Tabla 7.2. Resultados de penetración del Cono Sueco, Tepexpan

Penetración (mm)	Humedad (%)
2.5	22.8
4	25.7
8.5	27.7
13	28.1
14	31.3
19	32.6

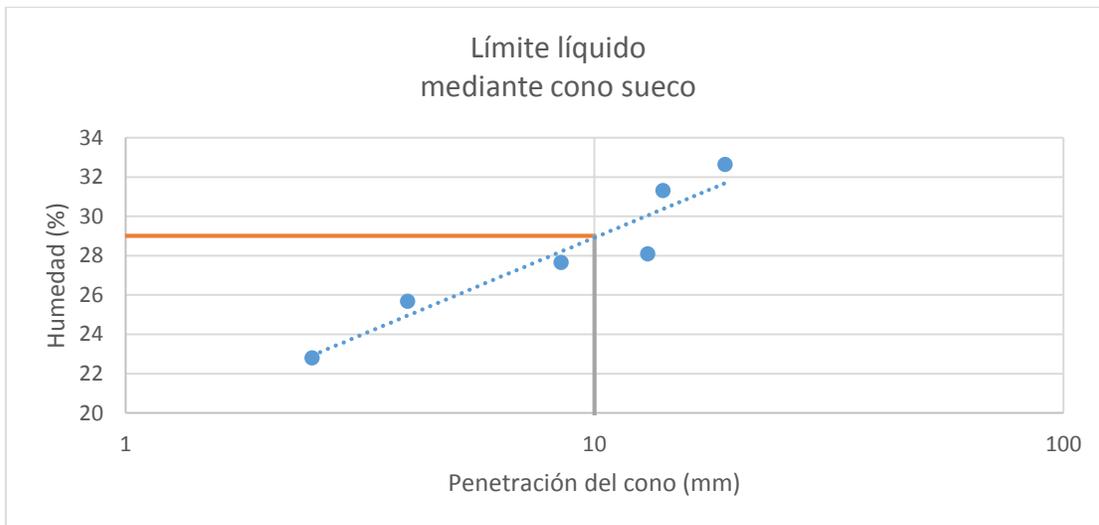


Figura 7.2. Determinación de límite líquido, Tepexpan

W_L cono (%)	29
W_L copa (%)	25.4

7.2 Determinación de la densidad de sólidos

La siguiente ecuación es la usada en la determinación de la densidad de sólidos de este tipo de material.

$$Gs = \frac{Ws}{Ws + Wmw - Wmwz}$$

Donde:

Ws : Peso seco del material.

Wmw : Peso del matraz con agua hasta el aforo, a la temperatura en la que se desarrolla la prueba.

$Wmwz$: Peso del matraz con material y agua al aforo; durante la prueba.

Calibración de matraces para pruebas de densidad de sólidos en el material de Xaltepec

Tabla 7.2. Calibración de matraz 1

MATRAZ 1					
Punto Número	Temperaturas medidas en el interior Matraz (°C)			Temperatura promedio (°C)	Peso matraz aforado (g)
1	31.3	31.8	31.7	31.60	678.73
2	27.6	28.2	28.4	28.07	679.38
3	24.6	25.5	25.9	25.33	679.62
4	22.4	24.3	24.6	23.77	679.88
5	19.2	20.8	21.1	20.37	680.23
6	17.8	18.7	20	18.83	680.41
7	15.2	16.4	17.5	16.37	680.53

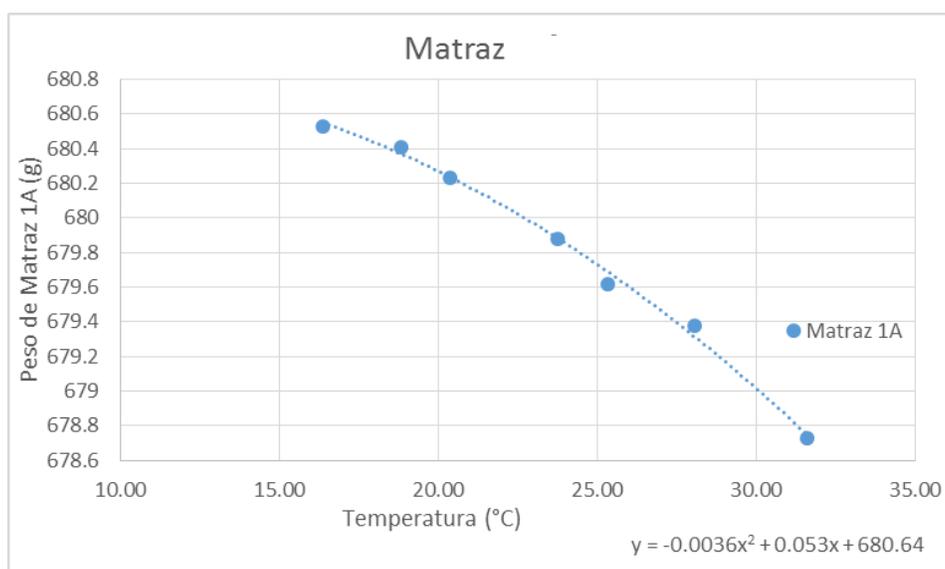


Figura 7.3. Curva de calibración de matraz 1

Tabla 7.3. Calibración del Matraz 2

MATRAZ 2					
Punto Número	Temperaturas medidas en el interior Matraz (°C)			Temperatura promedio (°C)	Peso matraz aforado (g)
1	29.4	30.6	30.9	30.30	675.64
2	27.3	28.1	28.5	27.97	676.18
3	24.3	25	25.7	25.00	676.56
4	21.8	22.8	23.5	22.70	676.8
5	19.3	20.4	21.3	20.33	677.24
6	16	16.9	18.2	17.03	677.45
7	14.2	14.9	16	15.03	677.74
8	30.4	30.6	30.4	30.47	675.71
9	22.7	23.9	25.5	24.03	676.8
10	19.7	21.3	22.5	21.17	677.05

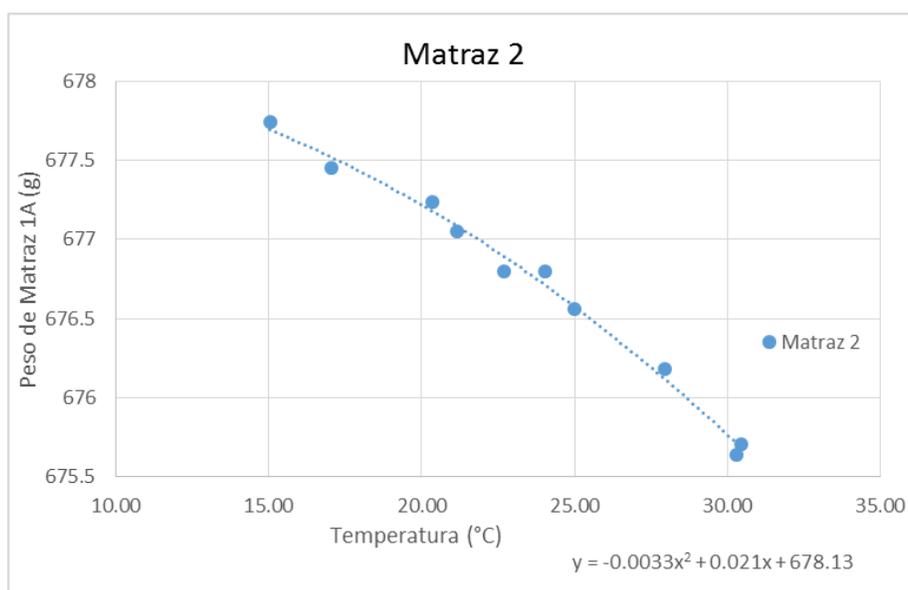


Figura 7.4. Curva de calibración del Matraz 2

En las Tablas 7.4, Tabla 7.5 y Tabla 7.6 se muestran los valores de cada uno de los parámetros que intervienen en la determinación de la densidad de los materiales, así como los resultados de ésta.

Tabla 7.4. Resultados de Densidad de Sólidos, Xaltepec

TEMPERATURAS DE LA PRUEBA				PROMEDIO
Temperatura interna en el matraz café (°C)	25.5	25.4	25.4	25.4
Temperatura interna en el matraz (°C)	24.9	25.2	25.2	25.1

Pesos de matraces (Wmwz)	
Peso matraz café + material + agua (g)	721.26
Peso matraz + material + agua (g)	715.49

Peso plato refractario 1A (g)	762.02
Peso plato refractario café + material seco (g)	829.82
Peso material seco (Ws) (g)	67.8

Peso plato refractario 1B (g)	760.93
Peso plato refractario + material seco (g)	824.78
Peso material seco (Ws) (g)	63.85

Temperatura del ensayo (°C)	Peso del matraz con agua al aforo (g)
25.1	676.6

Temperatura del ensayo (°C)	Peso del matraz café con agua al aforo (g)
25.4	679.7

Densidad de sólidos Gs	
------------------------	--

Material en matraz café	2.59
Material en matraz 2	2.56

Tabla 7.5. Determinación Densidad de Sólidos, Cerro Grande

TEMPERATURAS DE LA PRUEBA				PROMEDIO
Temperatura interna en el matraz 2 (°C)	23	23	23	23.0
Temperatura interna en el matraz 9 (°C)	23.1	23.1	23.1	23.1

Pesos de matraces (Wmwz)	
Peso matraz 2 + material + agua (g)	722.1
Peso matraz 9 + material + agua (g)	723.1

Peso plato refractario 2 (g)	167.4
Peso plato refractario 2 + material seco (g)	266.44
Peso material seco (Ws) (g)	99.04

Peso plato refractario 9 (g)	188
Peso plato refractario 9 + material seco (g)	286.5
Peso material seco (Ws) (g)	98.5

Temperatura del ensayo 2 (°C)	Peso del matraz café con agua al aforo (g)
23.0	659.0

Temperatura del ensayo 9 (°C)	Peso del matraz con agua al aforo (g)
23.1	660.5

Densidad de sólidos Gs

Material en matraz 2	2.76
Material en matraz 9	2.74

Tabla 7.6. Determinación Densidad de Sólidos, Tepexpan

TEMPERATURAS DE LA PRUEBA				PROMEDIO
Temperatura interna en el matraz 6 (°C)	22	22	21.9	22.0
Temperatura interna en el matraz 11 (°C)	22.1	22.1	22	22.1

Pesos de matraces (Wmwz)	
Peso matraz 6 + material + agua (g)	722.7
Peso matraz 11 + material + agua (g)	724.3

Peso plato refractario 6 (g)	188.4
Peso plato refractario 6 + material seco (g)	284.8
Peso material seco (Ws) (g)	96.4

Peso plato refractario 11 (g)	167.5
Peso plato refractario 11 + material seco (g)	265.59
Peso material seco (Ws) (g)	98.09

Temperatura del ensayo 6 (°C)	Peso del matraz café con agua al aforo (g)
22.0	659.4

Temperatura del ensayo 11 (°C)	Peso del matraz con agua al aforo (g)
22.1	659.8

Densidad de sólidos Gs

Material en matraz 6	2.91
Material en matraz 11	2.92

7.3. Desgaste en la máquina de Los Ángeles.

A continuación se muestran los valores que se obtienen al realizar las pruebas de desgaste en la máquina de Los Ángeles.

XALTEPEC				
P R U E B A N o . 1	PRUEBA DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES			
	Tipo de composición de la muestra: A			
	Prueba: 1			
	Masa inicial			
	# de malla	Peso (g)	Peso utilizado (g)	# de esferas
	3/8	1250	1252.6	12
	1/2	1250	1251.2	
	3/4	1250	1257.6	
	1	1250	1252.3	
	Total	5000	5013.7	
	Masa final:			
	# de malla	Peso (g)		
	12	4230		
	% de desgaste:		15.6	
	P R U E B A N o . 2	PRUEBA DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES		
Tipo de composición de la muestra: A				
Prueba: 1				
Masa inicial				
# de malla		Peso (g)	Peso utilizado (g)	# de esferas
3/8		1250	1259.53	12
1/2		1250	1257.88	
3/4		1250	1256.91	
1		1250	1252.39	
Total		5000	5026.71	
Masa final:				
# de malla		Peso (g)		
12		4154.6		
% de desgaste:		17.3		

% de desgaste promedio:	16.5
--------------------------------	-------------

CERRO GRANDE				
P R U E B A N o . 1	PRUEBA DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES			
	Tipo de composición de la muestra: A			
	Prueba: 1			
	Masa inicial			
	# de malla	Peso (g)	Peso utilizado (g)	# de esferas
	3/8	1250	1253.63	12
	1/2	1250	1254.64	
	3/4	1250	1252.02	
	1	1250	1256.15	
	Total	5000	5016.44	
	Masa final:			
	# de malla	Peso (g)		
	12	3790		
	% de desgaste:		24.4	
	P R U E B A N o . 2	PRUEBA DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES		
Tipo de composición de la muestra: A				
Prueba: 1				
Masa inicial				
# de malla		Peso (g)	Peso utilizado (g)	# de esferas
3/8		1250	1251.62	12
1/2		1250	1252.92	
3/4		1250	1252.57	
1		1250	1252.53	
Total		5000	5009.64	
Masa final:				
# de malla		Peso (g)		
12		3600		
% de desgaste:		28.1		

% de desgaste promedio:	26.3
--------------------------------	-------------

TEPEXPAN

PRUEBA DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES				
P R U E B A N o . 1	Tipo de composición de la muestra:		A	
	Prueba:		1	
	Masa inicial			
	# de malla	Peso (g)	Peso utilizado (g)	# de esferas
	3/8	1250	1253.14	12
	1/2	1250	1255.47	
	3/4	1250	1253.77	
	1	1250	1250.19	
	Total	5000	5012.57	
	Masa final:			
# de malla	Peso (g)			
12	3485			
% de desgaste:		30.5		

PRUEBA DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES				
P R U E B A N o . 2	Tipo de composición de la muestra:		A	
	Prueba:		1	
	Masa inicial			
	# de malla	Peso (g)	Peso utilizado (g)	# de esferas
	3/8	1250	1249.1	12
	1/2	1250	1251.14	
	3/4	1250	1251.47	
	1	1250	1249.48	
	Total	5000	5001.19	
	Masa final:			
# de malla	Peso (g)			
12	3460			
% de desgaste:		30.8		

% de desgaste promedio:	30.6
-------------------------	------

7.4. Determinación de permeabilidad

En las Tablas 7.6, Tablas 7.7 y Tabla 7.8 se muestran los resultados de las pruebas de permeabilidad llevadas a cabo en los dos materiales.

Tabla 7.6. Resultados de pruebas de permeabilidad, Cerro Grande

Pruebas con $i= 2.53$, Cerro Grande			
Prueba 1		Prueba 2	
Vol (ml)	16790.00	Vol (ml)	14590.00
t(s)=	18.21	t(s)=	15.02
Q (ml/s)=	922.02	Q (ml/s)=	971.37
k (cm/s)=	1.43E-01	k (cm/s)=	1.51E-01

Prueba 3		Prueba 4	
Vol (ml)	16830.00	Vol (ml)	15130.00
t(s)=	16.19	t(s)=	14.56
Q (ml/s)=	1039.53	Q (ml/s)=	1039.15
k (cm/s)=	1.61E-01	k (cm/s)=	1.61E-01

Tabla 7.7. Resultados de pruebas de permeabilidad, Cerro Grande

Pruebas con $i= 1.68$, Cerro Grande			
Prueba 1		Prueba 2	
Vol (ml)	11520.00	Vol (ml)	11850.00
t(s)=	8.23	t(s)=	8.12
Q (ml/s)=	1399.76	Q (ml/s)=	1459.36
k (cm/s)=	3.26E-01	k (cm/s)=	3.40E-01

Prueba 3		Prueba 4	
Vol (ml)	15270.00	Vol (ml)	16130.00
t(s)=	10.28	t(s)=	10.65
Q (ml/s)=	1485.41	Q (ml/s)=	1514.55
k (cm/s)=	3.46E-01	k (cm/s)=	3.53E-01

Tabla 7.8. Resultados de pruebas de permeabilidad, Cerro Grande

Pruebas con $i= 1.68$, Xaltepec			
Prueba 1		Prueba 2	
Vol (ml)=	13120.00	Vol (ml)=	12250.00
t(s)=	8.92	t(s)=	8.17
Q (ml/s)=	1470.85	Q (ml/s)=	1499.39
k (cm/s)=	3.43E-01	k (cm/s)=	3.50E-01

Prueba 3		Prueba 4	
Vol (ml)	13610.00	Vol (ml)	12420.00
t(s)=	8.99	t(s)=	8.36
Q (ml/s)=	1513.90	Q (ml/s)=	1485.65
k (cm/s)=	3.53E-01	k (cm/s)=	3.46E-01

