

Caracterización Mecánica de la Escoria Volcánica (Tezontle), de la Zona de Morelia, Michoacán, México.



2011 Pan-Am CGS
Geotechnical Conference

Chávez C. & Arreygue E.

Departamento de Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México

Alarcón J.

Departamento de Vías Terrestres, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México

ABSTRACT

In the center of Mexico there is a grand quantity of volcanic scoria (Tezontle), produced by the volcanic activity of the zone. Here are presented the results of an experimental program, obtained of three different scoria materials, with different porosities. The mechanical characterization consists of mechanical tests made to the single particles and tests to the group of them. Particle test were: density, porosity and point load test. Mechanical tests to the material were: monotonic, resilient and permanent deformation triaxial tests. An important observation was that the more porosity the material is the more cohesion is presented after dynamic compaction (until 196 kPa). A controversial characteristic was that for saturated uniform graded porous material had more strength the unsaturated. The probable cause was an internal suction in the inner of the particle.

PRESENTACIONES TÉCNICAS

En la zona centro de México existe una gran cantidad de escoria volcánica (Tezontle), como producto de la gran actividad volcánica del Cinturón Volcánico Transmexicano. En este trabajo presentarán los resultados de un programa experimental en tres materiales de escoria representativos de la zona, con diferentes porosidades. Se realizaron pruebas mecánicas a las partículas de manera individual y al conjunto de ellas. Entre las principales pruebas realizadas de manera individual fueron densidad, porosidad e índice de carga puntual; al material en su conjunto se le realizaron pruebas triaxiales, de módulo de resiliencia y deformación permanente, en granulometrías bien graduadas y uniformes, en estado seco y saturado. Como característica interesante se presentó que, las partículas de mayor porosidad al ser compactadas se incrustan unas con otras; dando como resultado resistencias a la compresión simple de hasta de 20 ton/m². Se observaron datos controversiales, es decir entre más poroso es el material, la resistencia del material saturado fue mayor. La causa probable, una succión en el interior en las partículas.

1 INTRODUCCIÓN.

La Escoria Volcánica, llamada tezontle en México, se forma cuando la lava tiene mucho gas que tiende a escaparse generando una espuma o burbujas. Además cuando la lava se solidifica da como resultado una roca con una textura vesicular. En particular en México, las escorias volcánicas se encuentran localizada en la zona centro del país, donde se ha presentado la mayor actividad volcánica.

El Estado de Michoacán es una de las zonas más representativas del vulcanismo Mexicano, tan solo en el Corredor Tarasco (también conocida como Meseta Purepecha), se observan más de 1,000 conos de vulcanismo monogenético, además de ser el sitio del surgimiento de los dos volcanes más recientes de México, el Jorullo en 1759 y el Parícutín en 1943. Las formas más comunes son los conos de ceniza o los de escoria. La composición química de la escoria volcánica que se encuentra localizada en el estado de Michoacán es de tipo calcoalcalina y varía desde un basalto hasta una riolita.

La grava de escoria volcánica se utiliza bastante en la construcción, debido a su abundancia en el estado de

Michoacán. Comúnmente se le han atribuido malas propiedades mecánicas debido a que su peso específico es bajo, resultado de su gran porosidad. A pesar de su frecuente utilización no se han realizado caracterizaciones mecánicas que arrojen datos sobre su comportamiento in situ.

En el presente artículo se presentan resultados de una caracterización mecánica intensa, que contempló la caracterización física y mecánica de las partículas y del conjunto de ellas. Las pruebas mecánicas se realizaron en un equipo triaxial y se hicieron pruebas de compresión simple, triaxiales rápidas en estados secos y saturados, pruebas de módulos de resiliencia y deformación permanente, estas últimas bajo cargas cíclicas. Los ensayos se realizaron en tres distintos tipos de escoria volcánica. Para poder comparar el comportamiento de los distintos materiales se supuso que las partículas eran solidas independientemente de la porosidad que tuvieran y se conformaron muestras con igual número de contactos entre sus partículas.

2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LAS PARTÍCULAS DE LA ESCORIA VOLCÁNICA.

Se realizaron muestreos de dos distintos bancos de escoria volcánica, procurando que tuvieran distintas porosidades y color. Los bancos seleccionados fueron: "Joyitas" (material 1, color negro) y "Cerritos" (material 2, color rojo y el 3, color negro), en el último se muestrearon dos frentes con distintas características. Estos bancos se encuentran localizados en las cercanías de la ciudad de Morelia Michoacán, México, y se han utilizado para la construcción de muchas obras civiles en la región.

Se tomaron fotografías con microscopio electrónico de barrido, para poder observar su micro-morfología, y poder tener idea de sus diferencias. El material se trituró para que pasara la malla No. 200 y poder tener una mejor apreciación de las partículas. En las Figuras 1, 2, y 3 se muestran las fotografías de los materiales 1 al 3 respectivamente. Los materiales están conformados por micro-partículas, semi-alargadas y con aristas pronunciadas. En los casos de los materiales 1 y 3, se observa una gama amplia de tamaños y en el material 2 se observan tamaños uniformes y con aristas.

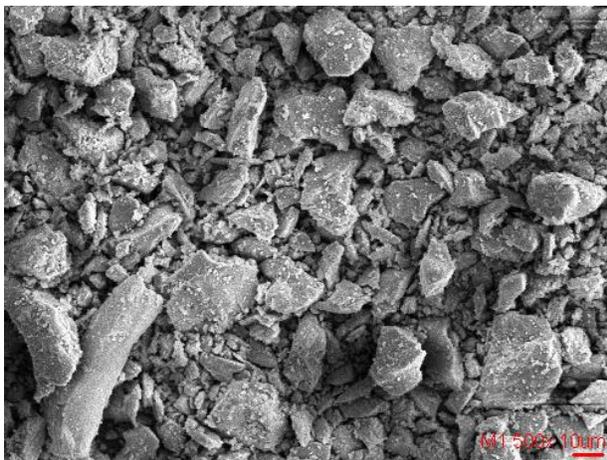


Figura 1. Fotografía de la micro-estructura del material 1.

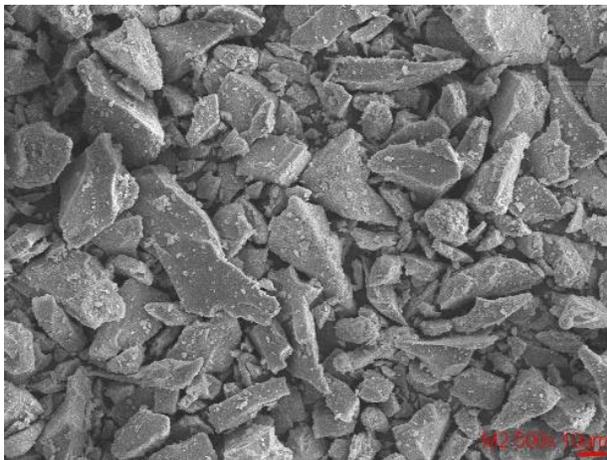


Figura 2. Fotografía de la micro-estructura del material 2.

Los minerales presentes en los materiales se enlistan en la Tabla 1. Los minerales son los mismos y con porcentajes similares, a excepción del material 3 que contiene titanio en una pequeña proporción. El color rojo

del material 2, se debe a una pequeña cantidad más de hierro y magnesio que le da la tonalidad.

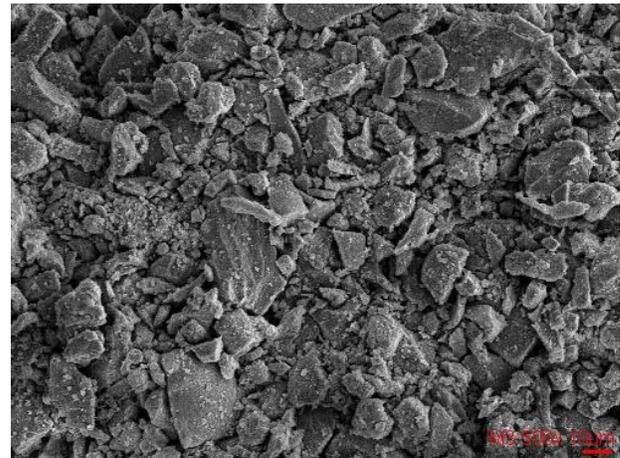


Figura 3. Fotografía de la micro-estructura del material 3.

Tabla 1. Porcentajes de minerales que contienen los materiales.

Mineral	1	2	3
Oxígeno	87.38	86.96	88.86
Aluminio	1.46	1.60	1.02
Silicio	5.07	5.01	4.65
Potasio	0.45	0.44	0.26
Calcio	1.61	1.88	1.24
Magnesio	0.11	0.14	0.10
Hierro	3.91	3.97	3.23
Titanio	-----	-----	0.62
Tin	-----	-----	-----
Total	100.00	100.00	100.00

En las Figuras 4 a 6, se muestran fotografías de las partículas a escala natural. A simple vista la única diferencia entre los materiales es el color en el material 2 y la porosidad variable del material 1.

A las partículas se les practicaron pruebas índices como densidad relativa de los sólidos, peso específico de las partículas, absorción, porosidad, índice de carga puntual y porcentaje de arcilla (ver Tabla 2). La densidad relativa de los sólidos se realizó por dos métodos, el primero con el método del picnómetro, del cual se obtuvo la densidad aparente y en el caso del segundo fue triturado hasta hacerlo polvo, tomando una muestra que pasó la malla No. 40 y se utilizó el método para suelos. Ambos procedimientos fueron realizados mediante el procedimiento que marca la norma M-MMP-1-05-03 de la SCT.

Se resalta que el resultado obtenido con el método del picnómetro se denomina densidad relativa aparente y el realizado en polvo triturado se denomina densidad relativa de los sólidos, para distinguirlos claramente ya que existen diferencias entre ellos. Si observamos el resumen de los resultados en la Tabla 2, se puede observar claramente, que existe una diferencia significativa entre ellos. La densidad relativa aparente es más pequeña, que la relativa de los sólidos. Esto se

debe al procedimiento de preparación de la muestra, y debido a la porosidad no conectada que se presenta en las partículas. Un estudio detallado de esta problemática se presenta en Tamari *et. al.*, (2005).



Figura 4. Fotografía de partículas del material 1.

Los resultados del peso específico de las partículas, fueron derivados como promedio de los obtenidos en una muestra representativa de cada uno de los materiales y muestran una variación similar a la densidad relativa aparente. Los datos de la absorción y los de la porosidad corroboran la existencia de vacíos no conectados entre las partículas (Tamari *et. al.*, 2005). Así mismo, la absorción no se relaciona con la porosidad de manera proporcional para este tipo de material. El índice de resistencia de la carga puntual (D 5731-05 de la ASTM), nos da una medida de la resistencia individual de las partículas y es mayor cuanto menor es la porosidad.

Tabla 2. Características físicas y mecánicas de las partículas en los bancos estudiados.

Material	1	2	3
Densidad relativa aparente (gr/cm ³)	2.05	1.29	1.29
Densidad relativa de sólidos (S _s)	2.642	2.561	2.583
Peso específico de las partículas (gr/cm ³)	2.176	1.518	1.495
Absorción (%)	4.54	20.35	20.22
Porosidad (%)	21.1	40.7	42.1
Índice de resistencia de carga puntual (kg/cm ²)	46.3	17.49	13.67



Figura 5. Fotografía de las partículas del material 2.

Un detalle que hay que resaltar, es la manera en que se rompieron las partículas con mayor porosidad (materiales 2 y 3, ver Figura 5 y Figura 6). Previo a la rotura de la muestra, la punta cónica del equipo de ensayo penetró en el espécimen produciendo primero un colapso local. Es decir, las pequeñas cavidades no resistieron la penetración de la punta cónica. Después de penetrar lo suficiente el ensanchamiento de la punta cónica produjo la rotura final total de la partícula. Al principio del ensayo el esfuerzo era superior a la resistencia local de las partículas, y la punta fue penetrando, con ello el área de contacto se fue incrementando y el esfuerzo fue disminuyendo hasta que fue igual que el de la resistencia local. Esto produjo una redistribución de esfuerzos en la partícula, aplicándose estos a la partícula. Como ya existía una fractura en la parte superior e inferior provocada por la penetración de las puntas cónicas, esta se propagó y con ello se produjo la rotura final de la partícula en esta línea. Este fenómeno tiene repercusiones en la interacción mecánica entre las partículas cuando se trata del material en conjunto, como se discute más adelante.



Figura 6. Fotografía de las partículas del material 3.

3 COMPORTAMIENTO TRIAXIAL DE LA ESCORIA VOLCÁNICA

Se llevaron a cabo pruebas triaxiales consolidadas drenadas, en los tres materiales. Los ensayos se realizaron con dos diferentes contenidos de humedad, un estado “seco” con un contenido inicial de 4.5%, con el que se compactaron todas las muestras y un estado “saturado”, que correspondía al contenido de agua que retenían las partículas después de saturarlas y después de compactada la muestra.

Debido a la alta permeabilidad del suelo, el procedimiento de saturación consistió solamente en hacer circular agua a través de la muestra, después de que el material se compactó y montó en la cámara. En ninguno de los casos se utilizó contrapresión para forzar la entrada del agua al interior de las partículas.

Se utilizó una cámara triaxial con tamaño de muestra de 7.66 cm de diámetro y 15 cm de altura. Se compactó dinámicamente con un martillo neumático, cuyo vástago tiene una placa con diámetro ligeramente inferior al diámetro del molde, donde se realiza la compactación. El tamaño máximo de la partícula utilizada fue menor a 1/6 del diámetro de la muestra, es decir 1/2” (1.27 cm). Se utilizaron dos granulometrías diferentes, una bien graduada y la otra uniforme. En la Figura 7 y Figura 8 se

muestran las curvas granulométricas de las muestras iniciales, después de la compactación y un ejemplo de granulometría después de una de las pruebas en el material 2. En general, la mayor cantidad de rotura de partículas se presentó durante la compactación, y con mayor énfasis en los materiales con granulometría uniforme.

3.1 Procedimiento de elaboración de las probetas de grava para la prueba triaxial.

Para poder hacer comparables los resultados entre distintos materiales y la misma granulometría, existió un problema, el cual fue la porosidad. Debido a que las partículas tienen un peso distinto entre ellas, el volumen de una fracción de material retenido entre dos mallas, con un cierto peso, es distinto del otro material. Así que se decidió formar las fracciones granulométricas para cada uno de los materiales en base a su volumen. Si se mantiene el volumen de las partículas antes y después de la compactación se supone que el número de contactos entre ellas es similar, aunque su peso específico sea distinto.

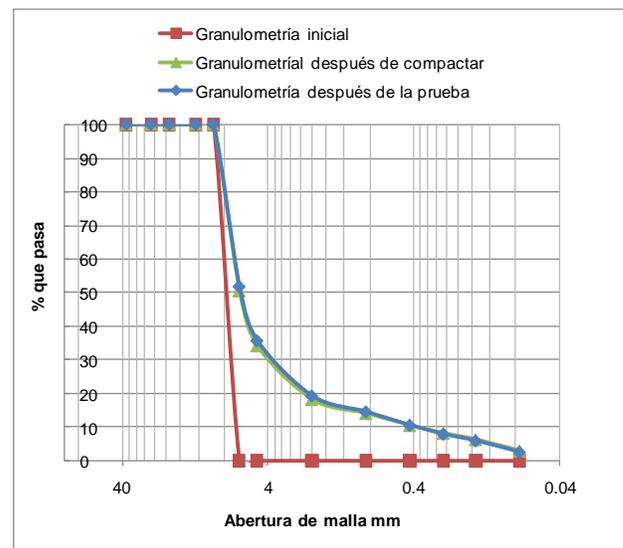


Figura 7. Granulometría Uniforme inicial, después de la compactación y después de la prueba.

Tomando como base el Material 1, se elaboró una probeta para determinar el peso específico de la muestra (γ_m). Con éste y los datos de peso específico de partícula y las dimensiones de la probeta, se calcularon las cantidades de material y volumen de partícula necesarios para formar las probetas.

Se obtiene la cantidad de material seco necesario para formar las probetas del Material 1. Con la siguiente ecuación:

$$Wp1 = \gamma_m V_m \quad [1]$$

Donde:

$Wp1$: peso de las partículas 1

γ_m : peso específico de la muestra

V_m : volumen de la muestra o probeta

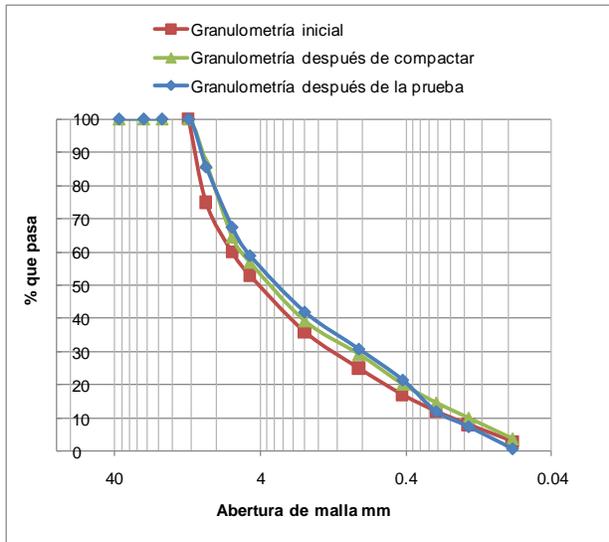


Figura 8. Granulometría Bien graduada inicial, después de la compactación y después de la prueba.

Con el valor de $Wp1$ se procede a calcular el volumen de las partículas 1, que será el mismo para los otros materiales.

$$Vp1 = \frac{Wp1}{\gamma_{p1}} \quad [2]$$

Donde:

$Vp1$ = volumen de las partículas 1

γ_{p1} = peso específico de las partículas del material 1.

Con el valor de $Vp1$ se procede a calcular la cantidad de material necesaria para formar las probetas utilizando los otros materiales.

$$\begin{aligned} Wp2 &= Vp1 * \gamma_{p2} \\ Wp3 &= Vp1 * \gamma_{p3} \end{aligned} \quad [3]$$

Donde:

$Wp2$ y $Wp3$: es la cantidad de material necesaria para formar las probetas de los materiales 2 y 3.

γ_{p2} y γ_{p3} , representan el peso específico de las partículas de los materiales 2 y 3.

Una vez que se tiene la cantidad de material necesaria para formar la probeta se le agrega agua y se homogeniza, de tal forma que la humedad que tenga el material será de aproximadamente el 4.5%. La muestra de suelo se colocará dentro del molde en cuatro capas, compactando cada una con la ayuda del martillo neumático y escurificando con una espátula antes de colocar la siguiente capa, esto hasta la altura de 15 cm que debe tener la probeta.

3.2 Resultados de las pruebas triaxiales.

Las gráficas esfuerzo-deformación se muestran desde la Figura 9 hasta la Figura 14. La gráfica izquierda son los

resultados de la prueba con contenido de humedad de 4.5% (material seco) la de la derecha la prueba con el material saturado.

Para el primer material la resistencia al corte del material seco es mayor que la del material saturado. La pendiente inicial es mayor en todos los casos que la del material seco. La resistencia a la compresión simple del material seco es de alrededor del 0.9 kg/cm^2 , es decir exhibe una pequeña cohesión, que es debida al contenido de agua que tiene; esta desaparece cuando el material se satura. Se debe notar que la forma de la curva después de la resistencia máxima es errática con incrementos de resistencia y bajadas repentinas, lo anterior fue acompañado de sonidos de rotura en esta etapa de las pruebas. Estas bajas repentinas de resistencia se deben a la rotura de las partículas bajo el esfuerzo de corte y posterior reacondo.

Los resultados de la prueba con granulometría bien graduada en general tienen la misma tendencia. Solo que la resistencia al corte es mayor que el caso anterior, se presenta un pico y después una caída de resistencia. El comportamiento errático no se presenta, es debido a que el esfuerzo entre las partículas es mejor y no se aprecia como en el caso anterior de la rotura de las partículas. La pequeña cohesión del material parcialmente saturado desaparece casi totalmente después de la saturación.

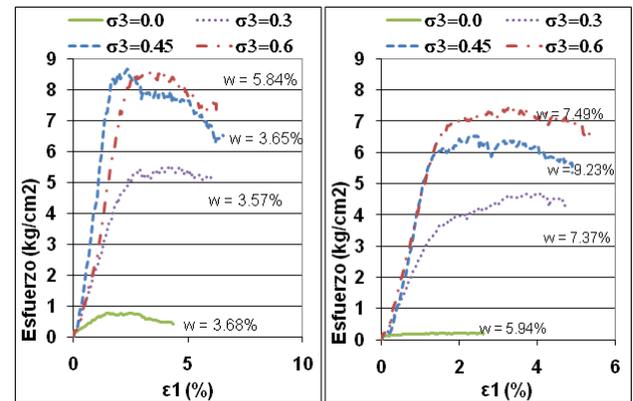


Figura 9. Resultados de pruebas triaxiales con granulometría uniforme. Material 1.

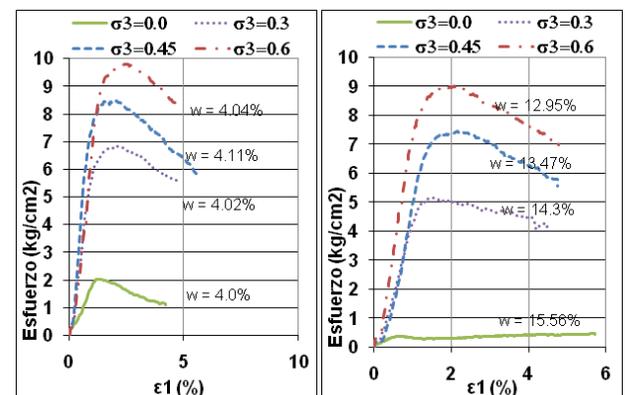


Figura 10. Resultados de pruebas triaxiales con granulometría bien graduada. Material 1.

Los resultados del material 2, granulometría uniforme (ver Figura 11) exhiben un comportamiento controversial, sobre todo que la resistencia del material saturado es mayor que la resistencia del material seco. Hay que recordar que la porosidad de este material es del doble que la del material 1. En el comportamiento hay que resaltar que la cohesión del material es alta, alrededor del 1.2 kg/cm², parte de ella se pierde después de la saturación, pero sigue siendo significativa, 0.9 kg/cm². Haciendo referencia a la manera que las partículas se rompieron durante la prueba de índice de carga puntual (ver fotografías de la Figura 5 y Figura 6), se puede deducir que las partículas se incrustaron unas con otras después de la compactación. Esta incrustación entre ellas produjo un cambio en el comportamiento y presentaron una cohesión significativa.

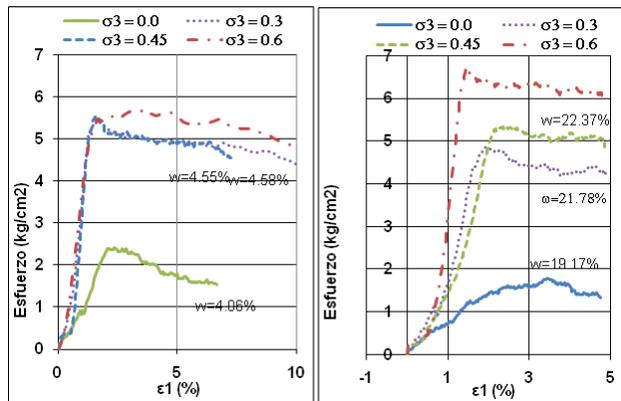


Figura 11. Resultados de pruebas triaxiales con granulometría uniforme. Material 2.

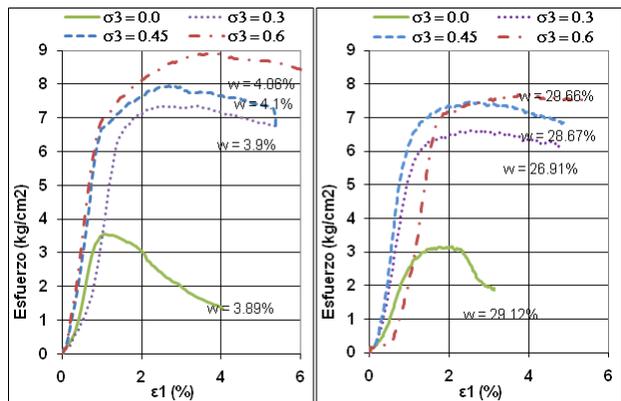


Figura 12. Resultados de pruebas triaxiales con granulometría bien graduada. Material 2.

Otro dato interesante es que para el material seco se presentó una sola resistencia al corte, independientemente de la presión de confinamiento, después se presentó el comportamiento errático del material. Si explicamos lo anterior en términos de la discusión previa, se diría que es el inicio de la rotura de las partículas y el material no soporta una mayor carga debido a la resistencia de las partículas. El material húmedo tiene la misma resistencia máxima para las presiones de confinamiento de 0.3 y 0.6, pero la presión

de confinamiento de 0.6 tiene una mayor resistencia. Hay que hacer notar además, que la pendiente de la curva de esfuerzo deformación de los materiales saturados, tiene un reacomodo inicial y la curva es cóncava hacia arriba, después de este acomodo inicial, la pendiente se incrementa considerablemente, para el material con $\sigma_3 = 0.6$ kg/cm², los otros siguen con la misma tendencia y no se rompen a un esfuerzo de 5. kg/cm², en promedio. Es posible que el aumento de la resistencia se deba al cambio de volumen, el material saturado tiene una dilatación menor que el material seco, por lo tanto, está más compacto.

El material bien graduado tiene mayor resistencia, e inclusive, mayor cohesión y como es de esperarse la resistencia del material seco es mayor que la del material saturado. Se presenta un pequeño quiebre en las curvas a una resistencia de 6.8 kg/cm², es el punto donde se inicia la rotura de las partículas y se presenta una fluencia significativa. Se debe resaltar que para el material bien graduado este punto de inicio de la rotura es mayor o igual que la resistencia al corte del material saturado, por esta causa sí se presenta mayor resistencia en el material seco.

El tercer material (granulometría uniforme, ver Figura 13) tiene un comportamiento similar al anterior, solo que en éste es más clara la resistencia al corte del material saturado en todos los ensayos (incluyendo el de compresión simple), la resistencia al corte es mayor en el material saturado. Se debe recordar que es el material con mayor porosidad (42%), y ello lleva a que exista mayor agregación entre las partículas. Lo contradictorio es que la resistencia saturada sea mayor, inclusive la cohesión no se pierda, sobre todo en la muestra con resistencia a la compresión simple.

En párrafos anteriores se argumentó que este incremento de resistencia era debido al cambio de volumen después de la compactación, pero hacen falta más estudios al respecto.

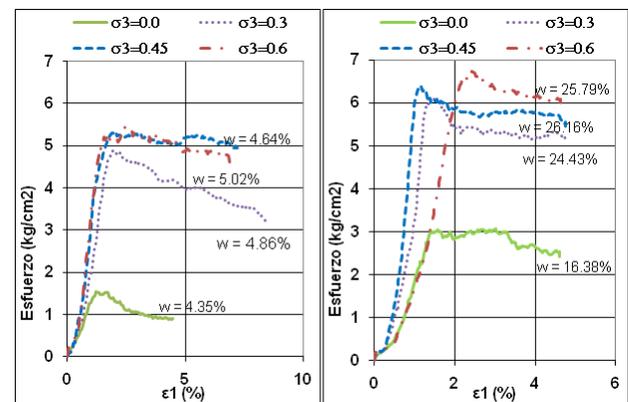


Figura 13. Resultados de pruebas triaxiales con granulometría uniforme. Material 3.

La única posible explicación está en la manera de romperse del material (ver foto de la Figura 3). El material 3 se rompe de una manera bien graduada esto puede ocasionar, fuerzas de succión que se generen en su interior. En el material 2 no se presenta esta forma de rompimiento, se rompe de manera uniforme. El material

con granulometría uniforme presenta un comportamiento en el cual el material seco tiene mayor resistencia y el saturado menor; la excepción es el comportamiento de los ensayos de compresión simple, por lo que el ensayo saturado tiene mayor resistencia.

Este tipo de comportamiento es errático y tiene aparentemente algunas inconsistencias. Se necesita realizar más investigación al respecto para poder explicar el comportamiento del material.

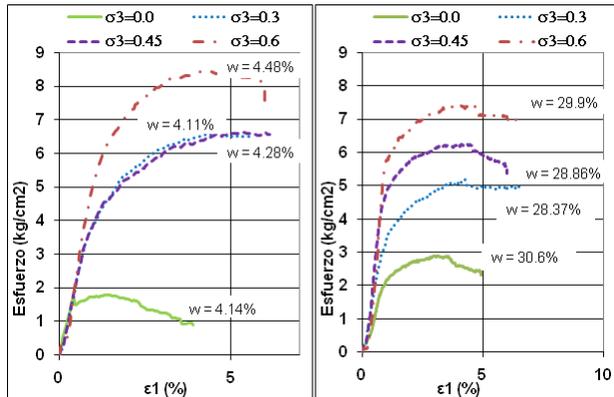


Figura 14. Resultados de pruebas triaxiales con granulometría bien graduada. Material 3.

4 ENSAYOS DE MÓDULO RESILIENTE Y DEFORMACIÓN PERMANENTE.

En esta etapa sólo se escogió el material 1. Ya que era el que presentaba mejores características para ser utilizado como material de base de un pavimento. Las pruebas se realizaron tomando en cuenta la norma T 307-99 del AASHTO. La carga cíclica se aplicó en un equipo que genera pulsos de carga y no la onda haversine que marca la norma antes mencionada. El tamaño de las muestras es el mismo que el de las pruebas triaxiales.

El contenido de humedad en ésta prueba se realizó por medio de un circuito cerrado donde se controlaba la humedad relativa (Figura 15). Las muestras de material se ensayaron en equilibrio con dos humedades relativas (HR) 50 y 100%, para las granulometrías bien graduada y uniforme. El 50% de HR corresponde aproximadamente a la humedad que adquiere el material en un cuarto a una temperatura de 20°C, es decir un material seco a la vista.

En todos los casos las muestras contaban al inicio con una humedad relativa del 100% (que significaba un contenido de humedad de 6.7% para el material mal graduado y 11% para el bien graduado) y se redujo paulatinamente hasta alcanzar un 50%, colocando hidróxido de sodio en un recipiente en el circuito. Eventualmente el recipiente se retiraba del circuito, al cabo de un tiempo se equilibra la humedad relativa en el interior de la muestra. El un periodo aproximado de 2 semanas se alcanzaba la humedad relativa de 50%. Inmediatamente después se realizaba la prueba de módulo de resiliencia.

En la Figura 16 y 17 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados, se muestran el módulo de resiliencia contra el invariante $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$. La

tendencia de los resultados para la granulometría uniforme (Figura 16) en la misma que para los materiales muy porosos (2 y 3). Los mayores módulos son los que corresponden al material con mayor humedad. Las líneas de ajuste son casi paralelas lo que sugiere que existe una correlación directa, la variación intermedia se ha observado que es no lineal (Oldecop, 2000, Chávez 2004), sin embargo, se deben realizar más ensayos para corroborar esta afirmación. La misma discusión anterior es válida para analizar el comportamiento de los suelos uniformes, excepto que en este caso el análisis es para pequeñas deformaciones, esto no se apreció en las pruebas triaxiales para deformaciones mayores en el material 1. En las pruebas en el material bien graduado (Figura 17), el material seco tiene un módulo más alto que el material húmedo.

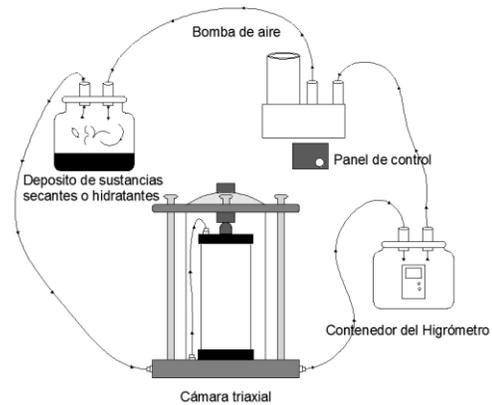


Figura 15. Circuito cerrado para el control de la humedad relativa (Chávez et. al., 2010).

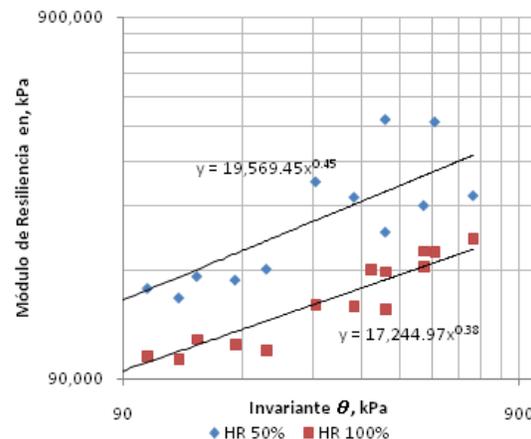


Figura 16. Resultados de pruebas de módulo de resiliencia con granulometrías uniforme y humedades relativas de 50 y 100%.

5 ENSAYOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE.

Al no haber un protocolo de prueba se adaptó el método de prueba utilizado por Khogali y Mohamed (2004). Este consistía en aplicar un esfuerzo desviador de igual magnitud que el que recibía un pavimento real.

Para nuestro caso se empleó un pavimento de dimensiones tradicionales en México, el esfuerzo era producido por un camión tipo C2. Para obtener los

esfuerzos y el confinamiento se utilizó el programa Kenlayer, el cual nos arrojó la siguiente información: un esfuerzo de confinamiento de 6.15 psi y un esfuerzo desviador de 370.9 kPa, a una profundidad de la capa de base.

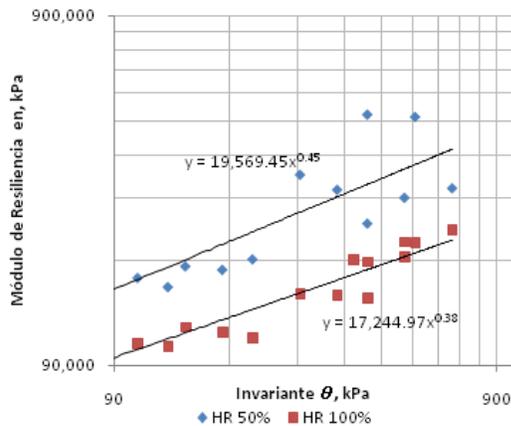


Figura 17. Resultados de pruebas de módulo de resiliencia con granulometría bien graduada y humedades relativas de 50 y 100%.

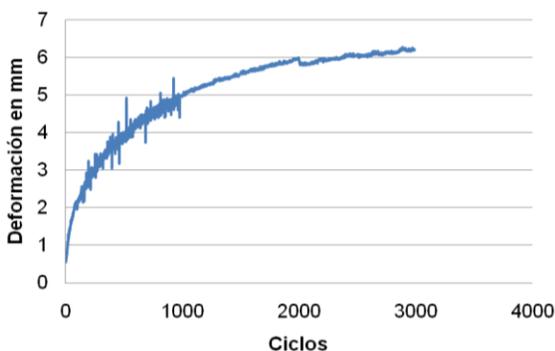


Figura 18. Resultados de ensayos de deformación permanente en granulometría bien graduada, saturada. Material 1.

El material 1 con granulometría bien graduada a humedad óptima se sometió a 3,000 ciclos de carga y descarga. Los Resultados se muestran en la Figura 18. Se observa el rápido incremento de deformaciones, al final de la prueba se aprecia una tendencia a seguir deformándose. La deformación total presentada fue del 4.3%, lo que significa para el ejemplo analizado alrededor de ¼ de pulgada. El criterio de falla por deformaciones permanentes suele ser entre ½ y 1 pulgada, dependiendo del tipo de camino, en este caso es una deformación considerable para ser una capa de base y a una edad muy temprana, sin embargo, todavía falta cuantificar la deformación de las otras capas. Lo anterior se presenta sobre todo en pavimentos con espesores de carpeta bajos.

6 CONCLUSIONES

Se realizaron pruebas físicas y mecánicas en partículas individuales y conjunto de partículas en material de Tezontle. Se probaron materiales con distintas

porosidades lo que influyó en su comportamiento. Cuando se someten a carga puntual las partículas con porosidades mayores al 40% presentan una manera de romperse distinta, primero existe un colapso local, después penetra la punta cónica y enseguida se rompe la partícula. Este fenómeno afecta el comportamiento del material en conjunto, en mayor medida cuando se trata de un material uniforme. Este fenómeno produce agregación de partículas dándole cohesión al material. Esta cohesión parece aumentar en materiales saturados, es especular sobre la causa, atribuyendo el incremento de cohesión a una succión dentro de las partículas. Por lo tanto se tienen que realizar más estudios sobre el tema. En materiales menos porosos (material 1) se presentó un fenómeno similar en pequeñas deformaciones, en las pruebas de módulo de resiliencia.

Por otro lado, se realizaron pruebas de deformación permanente y se presentó un incremento importante de deformación durante los primeros 3000 ciclos de carga, deformación nada despreciable, como para no tomarla en cuenta en los diseños de pavimentos con este tipo de material, ya que se suele tomar sólo la deformación de la capa de sub-rasante.

En general el material presenta algunos comportamientos atípicos, que vale la pena estudiar con mayor profundidad para poder explicarlos de una mejor manera.

7 REFERENCIAS

- ASTM Standard D4767 – 04. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.
- ASTM Standard D5731 – 05, “Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock”.
- Chavez, C. 2004. *Estudio del comportamiento triaxial de materiales granulares de tamaño medio con énfasis en la influencia de la succión*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Chávez C., Alarcón J., Arreygue E., Domínguez T. y Jerónimo F. J. 2010. Variación del Módulo de Resiliencia en Tezontle Sometido a Cambios de Humedad Relativa. XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 3:1227-1233. Acapulco, Guerrero, México.
- Khogali, W.E.I.; Elhussein H. M. 2004. Novel Approach For Characterization Of Unbound Materials. Report NRCC-47023. National Research Council Canada.
- Norma SCT, M-MMP-1-05-03, “Densidades relativas y absorción”.
- Oldecop, L. 2000. *Compresibilidad de Escolleras Influencia de la Humedad*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Tamari, S., Samaniego, D., Bonola, I., Bandala, E. R., and Ordaz, V. 2005. Particle Density of Volcanic Scoria Determined by Water Pycnometry, *Geotechnical Testing Journal*, 28(4):1-7.