

Resistencia al esfuerzo cortante en suelos pumíticos

Shear strength in pumice soils

Gil Humberto OCHOA-GONZÁLEZ¹, David VARGAS-DEL-RÍO¹ y Pablo Enrique ZAMUDIO-ZAVALA¹

¹ Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO)

RESUMEN: La mayoría de los suelos que se encuentran en el Área Metropolitana de Guadalajara provienen principalmente de la caldera de La Primavera cuya última actividad se dio en tiempos geológicos recientes, hace 30,000 años aproximadamente. Actualmente la técnica de penetración estándar (SPT) es la más utilizada para la exploración del subsuelo y para la obtención de los parámetros de comportamiento mecánico; sin embargo, hay pocos trabajos que relacionen los datos obtenidos con esta técnica y la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos de Guadalajara. Como etapa inicial para correlacionar estos valores, se presenta este trabajo, se realizaron pruebas de corte directo y triaxiales variando características físicas de los suelos y registrando la resistencia al esfuerzo cortante máxima y residual: se varió su granulometría, peso volumétrico seco y contenido de agua. Se determinó la influencia de estos factores con la resistencia al esfuerzo cortante. El mejor ajuste se dio con el Peso Volumétrico Seco. Además algunas pruebas demuestran que los suelos presentan una resistencia por cohesión que debería ser considerada al estudiar el comportamiento de estos suelos. En un trabajo posterior se deberán relacionar estos resultados con los datos obtenidos por medio de la prueba de penetración estándar.

ABSTRACT: Most soils found in Guadalajara Metropolitan Area come mainly from La Primavera caldera whose last activity occurred in recent geological times, about 30,000 years ago. Currently the technical of standard penetration (SPT) is the most used for subsurface exploration and to obtain the parameters that govern the mechanical behavior; however, there are few studies relating the data obtained with this technique and the actual shear strength of Guadalajara soils. As a first step in correlating these values this job is presented, direct shear and triaxial tests were conducted varying some physical characteristics of the soils and recording the maximum and residual shear strength: Particle size distribution, dry volumetric weight and water content was varied. The influence of these factors with shear strength was determined. Best fit was achieved with dry volumetric weight. Furthermore, some evidence shows that soils exhibit cohesion that should be considered when studying the behavior of these soils. In a later work these results should be related with the data obtained by the standard penetration test.

1 ANTECEDENTES

1.1 Suelos pumíticos provenientes de La Primavera.

La Sierra La Primavera (llamada antes Sierra del Astillero) constituye una estructura volcánica compleja denominada caldera. Por su origen volcánico complejo, la sierra la primavera está constituida por domos, derrames de lava, depósitos de pómez de caída libre y flujos de ceniza; estos flujos de ceniza en particular son denominados Toba Tala fueron generados por erupciones ocurridas desde hace 140,000 hasta hace 30,000 años (Mahood 1977, Mahooh y Halliday 1988).

En una gran parte del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), hay depósitos de suelos pumíticos con granulometrías comprendidas en el rango de limos a gravas, llamadas localmente “jales”, pero abundando principalmente arenas y arenas limosas. Llamadas “arenas amarillas” y “tepetate”.

Estas partículas de suelo son ligeras (pesos volumétricos naturales de 8.8 a 13.7 kN/m³, normalmente), erosionables, triturables, con superficie rugosa, y, en algunos casos, con cementación débil a media (Lazcano 2001).

Existen antecedentes de estudios de las características de los suelos del AMG como el trabajo de Saborío Ulloa (1998), en donde se concluye la falta de un mayor número de estudios y el “abuso” en el uso de la técnica de penetración estándar en la obtención de parámetros de diseño de cimentaciones.

2 PROCEDIMIENTO

2.1 Pruebas realizadas

Para verificar el comportamiento a la resistencia al corte de estos suelos se llevaron a cabo dos series de pruebas:

Una primera serie que constó de 32 pruebas de corte directo en donde se relacionaron la granulometría, el peso volumétrico seco y el grado de saturación con la resistencia al corte.

Una segunda serie consistió en tres pruebas triaxiales, a tres presiones de confinamiento cada una con la finalidad de analizar el aporte de la fricción intergranular y la cohesión a la resistencia al corte.

2.2 Pruebas de corte directo para relacionar variables con resistencia al corte.

Las pruebas de corte directo fueron diseñadas como un experimento de regresión multivariable para identificar en qué medida las variables controladas afectan la resistencia al esfuerzo cortante. Si bien estas pruebas no se realizaron con diferentes esfuerzos normales, lo que permitiría encontrar los parámetros de resistencia al corte, ángulo de fricción y cohesión, si permite hacer el análisis para saber cómo afectan las variables controladas en la respuesta total de resistencia al esfuerzo cortante. Las variables que se controlaron se describen a continuación:

2.2.1 Granulometría del suelo

En el control de esta variable se buscó contar con representación de los materiales que comúnmente se encuentran en la zona, tomados desde los dos extremos granulométricos. Por un lado limos inorgánicos o cenizas volcánicas, conocidos en la región como tepetate y en el otro extremo los conocidos localmente como jales o lapillis de granulometría más gruesa.

Primeramente se realizó el análisis granulométrico de estos dos tipos de materiales para conocer su clasificación S.U.C.S y la granulometría correspondiente, con la finalidad de nombrarlos de manera más formal se puede mencionar que se clasificaron como arena limosa con gravas (SM)g y como arena limosa (SM). Con esos dos "extremos" se elaboraron suelos con distribuciones granulométricas intermedias mezclando los suelos en diferentes porcentajes, quedando de la siguiente manera:

1. Suelo 1 (SM)g 100%
2. Suelo 2 (SM) 100%
3. Suelo 2 (SM) 66%, suelo 1 (SM)g 33%
4. Suelo 2 (SM) 33% y suelo 1 (SM)g 66%

2.2.2 Energía de compactación

La segunda variable que se controló fue la energía de compactación, si bien el análisis de respuesta de las variables se hizo con el peso volumétrico seco obtenido, se optó por controlar la energía de compactación al preparar la muestra para un manejo más simple y ágil en el laboratorio.

Las muestras se compactaron dentro de la caja de corte, en todos los casos fueron muestras remoldeadas. Se compactó con un pisón de 9.81×10^{-3} kN, una altura de caída de 0.17 m, el volumen de la caja de corte fue de 3.5×10^{-4} m³, la energía de compactación se varió según la fórmula (Proctor 1933):

$$E_e = \frac{NnWh}{V} \quad (1)$$

donde: E_e = energía de compactación; N = número de golpes por capa; n = número de capas; W = peso del pisón; h = altura de caída del pisón; V = volumen del molde.

De esta manera se controló la energía de compactación por medio del número de golpes por capa, en todos los casos se utilizaron tres capas y se manejaron cuatro energías diferentes de compactación, tomando en cuenta el valor máximo la energía especificada en la prueba de Proctor modificada o ASTM-1557 (2012):

1. 0 kN·m/m³ se colocó a volteo.
2. 869.6 kN·m/m³ lo que se consideró como 33% del valor máximo utilizado, equivalente a 60 golpes por capa.
3. 1779 kN·m/m³ lo que se consideró como 66% del valor máximo utilizado, equivalente a 124 golpes por capa.
4. 2696 kN·m/m³ lo que se consideró que corresponde al valor máximo utilizado, equivalente a 188 golpes por capa.

2.2.3 Grado de saturación

La tercera variable controlada fue el grado de saturación usándose los siguientes valores:

1. Seco $S=0\%$
2. Bajo $S=33\%$
3. Medio $S=66\%$
4. Alto $S=100\%$

donde S = grado de saturación.

2.3 Triaxiales

Las pruebas triaxiales que se llevaron a cabo fueron tres series cada una con tres presiones de confinamiento la más baja de 49 a 54 kN/m²; intermedia de 98.1 kN/m² y la mayor de 196 kN/m², se utilizó el método de multitriaxiales cuando fue posible (si no se destruía la muestra). Se varió el material y el peso volumétrico, los materiales fueron los mismos que los descritos anteriormente. Se utilizó una cámara triaxial que permite especímenes de 10 cm de diámetro, dichos especímenes fueron remoldeados, uno fue realizado con el suelo 2 (SM) en condición compactada solamente para darle estabilidad a la muestra y los otros se buscaron compactaciones mayores, uno se fabricó con el suelo 1 (SM)g y el otro con el suelo 2 (SM), en la sección de resultados.

3 RESULTADOS

3.1 Granulometrías

Como ya se mencionó antes según su clasificación S.U.C.S. el suelo uno (SM)g resultó ser una arena limosa con gravas con los siguientes porcentajes de material en peso: Gravas = 33%, arenas = 54% y finos = 13%. El suelo dos resultó una arena limosa (SM) con los siguientes porcentajes, también en peso: Gravas = 10%, arenas = 62% y finos = 28%.

3.2 Resultados corte directo para relacionar variables

Los resultados de las 32 pruebas de corte directo realizadas se presentan en la Figura 1, en donde se grafica para las 32 pruebas el porcentaje de deformación horizontal contra la relación de esfuerzos cortante y normal (τ/σ), las líneas incluyen todas las pruebas con la combinación de todas las variables controladas, se puede apreciar como algunas presentan una variación significativa entre el esfuerzo cortante máximo y el residual mientras que otras muestras no presentan una cresta en el esfuerzo cortante máximo, sino que el residual es coincidente con este. El rango de la relación máxima de esfuerzos τ/σ varía desde 0.6 hasta más de 1.8, mientras que la variación del esfuerzo residual es menor y se puede decir que es siempre menor a 1 (salvo una prueba).

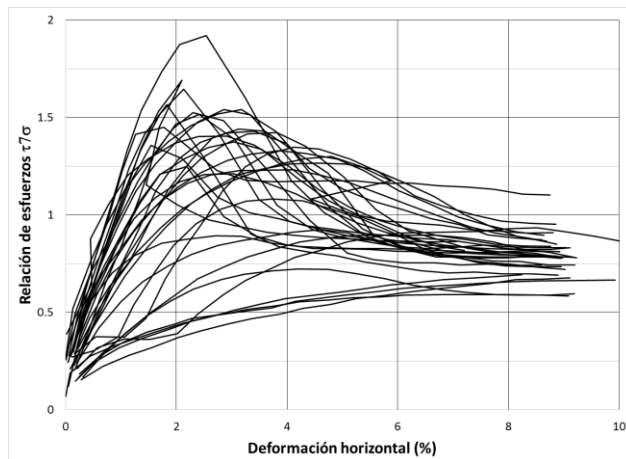


Figura 1. En esta figura se presenta la relación de resistencia de esfuerzo normal y esfuerzo cortante desarrollado dependiente de la deformación de las muestras, todas las pruebas fueron realizadas bajo una carga normal de 981 N.

Además en la figura 1 se puede apreciar que los esfuerzos cortantes máximos, cuando se forman crestas, se presentan en deformaciones desde el 2% y hasta antes de aproximadamente el 5%, mientras que el residual se presenta en aproximadamente del 7 al 8% de la deformación en la mayoría de los casos.

Si se supusiera que no existe cohesión en estos materiales, como comúnmente se hace en la región por definírseles como arenas, una relación de esfuerzos τ/σ de uno significaría un ángulo de fricción de 45° , una relación menor o mayor correspondería de manera proporcional a un ángulo mayor o menos de 45° . Haciendo esta suposición de que no hay cohesión el rango de ángulos de fricción interna variarían como se muestra en la figura 2. En ella se puede observar en el eje de ordenadas la relación de esfuerzos τ/σ respecto al valor de esfuerzo normal en el eje de las abscisas, se puede ver que en 31 de los 32 resultados los ángulos de fricción residuales que resultarían si no hubiera cohesión se encontrarían entre los 44° y 30° , el resultado descartado en la gráfica es de 48° ; mientras que los ángulos máximos se encuentran (también descartando un resultado por su dispersión) entre los 57° y 31° , el resultado descartado en la gráfica es de 62° .

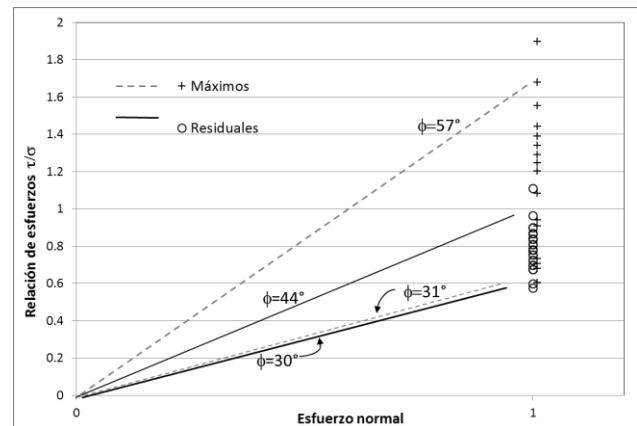


Figura 2. Se presentan los ángulos de fricción que resultarían de las 32 pruebas de corte directo si se supone que son suelos sin cohesión, como comúnmente se hace en la región.

Del análisis de regresión multivariable se infiere que el factor que más influye en el ángulo de fricción (obtenido sin considerar cohesión) es el peso volumétrico seco, que varió entre 8.0 y 13.1 kN/m³. Esto arroja un valor de confiabilidad superior al 95% y un coeficiente de determinación de 96.7%. Sin embargo, si se considera también la influencia de la granulometría este coeficiente aumenta hasta el 97.8%. El grado de saturación, por su parte, no influyó de manera significativa en el ángulo de fricción.

3.3 Resultados pruebas triaxiales

Para validar los resultados anteriores, se realizaron pruebas triaxiales. En la figura 3 se graficó el esfuerzo desviador contra la deformación axial de las muestras (ver figura 3). Como ya se mencionó, la prueba uno corresponde a las arenas limosas (SM)

con menor compactación, mientras la dos y la tres, que fueron compactadas, corresponden respectivamente a las arenas limosas con grava (SM)g y las arenas limosas (SM). Los pesos volumétricos secos obtenidos fueron de 10.8, 15.9 y 15.7 kN/m^3 respectivamente. En la figura 3 se puede apreciar claramente que la prueba uno, la de menor peso volumétrico, tuvo una resistencia considerablemente menor que las dos con pesos volumétricos mayores.

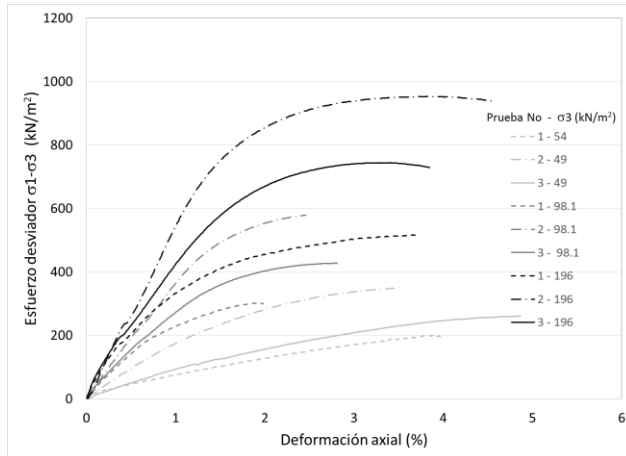


Figura 3. Esfuerzo desviador y deformación axial de las pruebas triaxiales realizadas, la prueba uno tuvo un peso volumétrico seco considerablemente menor que la dos y la tres coincidiendo con su menor resistencia al esfuerzo desviador.

En la figura 4 se muestran los círculos de Mohr utilizados para calcular los ángulos de fricción y cohesiones, se obtuvieron los siguientes valores: prueba uno $\phi = 31^\circ$ y cohesión = 27.3 kN/m^2 ; prueba dos $\phi = 42^\circ$ y $c = 39.7 \text{ kN/m}^2$ y prueba 3 $\phi = 39^\circ$ y $c = 24.6 \text{ kN/m}^2$.

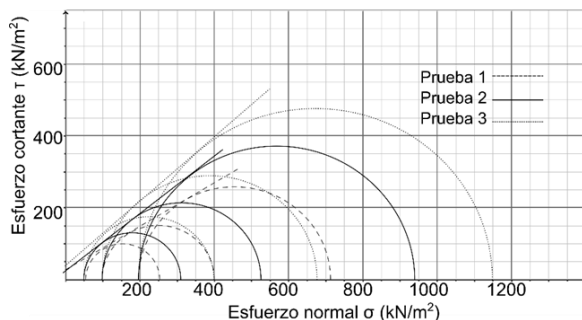


Figura 4. Círculos de Morh obtenidos con las pruebas triaxiales realizadas. Se observa que todas tienen cohesión.

Las cohesiones encontradas con estas pruebas triaxiales son consistentes con otras series de pruebas que los autores han realizado en suelos pumíticos de Guadalajara.

4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

La comparación de los resultados con las pruebas triaxiales valida los resultados del análisis de regresión multivariable, a la vez que presenta cuestionamientos que deben señalarse. Cabe mencionar que sólo son comparables en la zona sombreada que se presenta en la figura 5.

Los resultados de las pruebas de corte directo, que se realizaron durante el análisis de regresión multivariable, se presentan como líneas de falla. Como puede observarse, los valores de las tres pruebas triaxiales realizadas durante la validación están dentro del rango de los 32 que se obtuvieron para el análisis de regresión multivariable. Además, es notable la cercanía en las magnitudes de los ángulos de fricción interna máximos y mínimos de las pruebas triaxiales (ángulos ciertos) y los ángulos residuales de las pruebas de corte directo (ángulos calculados bajo el supuesto que no hay aporte por cohesión). Sin embargo, la existencia de cohesión implica que deben realizarse más pruebas de corte directo, variando el esfuerzo normal, para considerar su efecto.

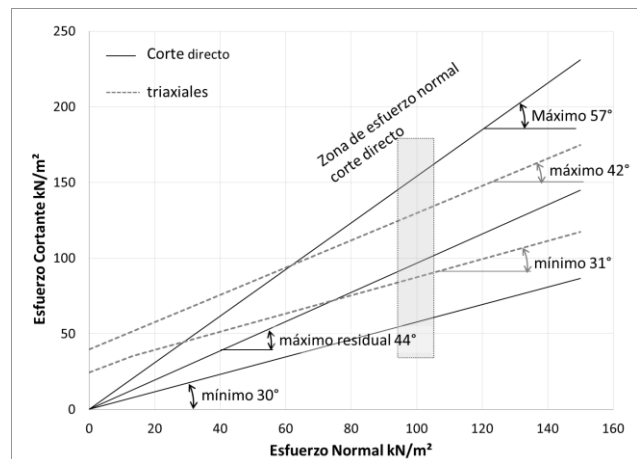


Figura 5. Comparación de resultados de pruebas de corte directo y triaxiales. Los resultados obtenidos con las pruebas de corte directo (líneas continuas) son válidos solo dentro de la zona sombreada, mientras que las triaxiales (líneas discontinuas) representan la envolvente de falla completa.

5 CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Es común en el Área Metropolitana de Guadalajara que se desprecie la resistencia por cohesión de los suelos. La evidencia presentada aquí demuestra que es un error despreciar la cohesión de las arenas limosas de la zona. Además se ha demostrado que la resistencia al esfuerzo cortante depende sobre todo de su peso volumétrico seco (o relación de vacíos); por lo menos en el rango de esfuerzos

estudiado, pero es de esperarse que esto suceda en otros rangos. Por lo tanto, una futura línea de investigación es incorporar al análisis de regresión multivariable, la influencia de la cohesión.

Los autores entendemos que al tratar con suelos saturados - no saturados se deben tener en cuenta los valores de esfuerzo total, presión de aire y presión de agua. Consideramos que se deberán estudiar las curvas características de estos suelos y utilizar expresiones, como la propuesta por Bishop (1960), para tener un modelo más completo. Sin embargo, como se ha visto, son factores poco significativos. Por lo tanto, para la ingeniería práctica del día a día, puede simplificarse el análisis al peso volumétrico seco.

Debe mencionarse también que el hecho de considerar, como erróneamente ocurre, altos valores de ángulos de fricción sin cohesión, implica un factor de seguridad arriba de uno para solicitaciones de esfuerzos normales bajos. Sin embargo, cuando esta misma práctica se realiza con solicitaciones de esfuerzos normales altos, la resistencia al cortante se estará sobrevaluando y el factor de seguridad disminuirá por debajo de 1.

Se puede observar que los ángulos de fricción residuales de las pruebas de corte directo son similares a los obtenidos con la prueba triaxial. Esto sugiere que los ángulos de fricción residuales podrían ser los reales. Sin embargo, debería investigarse si bajo condiciones variables de saturación, la resistencia residual presenta un aporte de cohesión, o si se pierde una vez que se ha rebasado el máximo esfuerzo. Además, considerando el efecto de la dilatación, también debería estudiarse el efecto de la trabazón entre partículas en las pruebas que presentan un mayor peso volumétrico, así como en aquellas pruebas de corte directo con valores altos de esfuerzo normal. Podría estudiarse también cuál es la relación de vacíos a la que ocurre la resistencia al esfuerzo cortante residual.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es que en campo puede observarse que las arenas limosas de la zona de Guadalajara presentan una cohesión *in-situ* que permite excavaciones verticales de varios metros de altura. Es una cohesión que no se recupera al romperse. Es posible que se deba a una cierta sinterización de los vidrios volcánicos que componen los suelos provenientes de la Caldera de la Primavera, debida a una deposición a altas temperaturas. Este estudio está despreciando esa cohesión; su análisis sólo podría realizarse con muestras inalteradas o pruebas de campo.

Por otro lado, es sabido que la manera de compactar estos suelos provoca rotura de granos, cambio en la granulometría, y cambios en la forma de las partículas. La baja influencia de la granulometría en términos estadísticos hace pensar que este factor no es relevante. Sin embargo, nuestro análisis no contempla la influencia de la

angulosidad que pueden adquirir los granos al romperse. Es un factor que debería estudiarse con mayor detenimiento.

6 AGRADECIMIENTOS

Se agradece la participación de diversos alumnos de ingeniería civil y ambiental de Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente por medio de los Proyectos de Aplicación Profesional, en especial al ingeniero René Aubert Alatorre

REFERENCIAS (EJEMPLOS)

- ASTM D-1557. (2012). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kn-m/m³)).
- Bishop, A. W. (1960). "The measurement of pore pressure in the triaxial test". *Proceedings of the conference Pore pressure and suction in soils*. Butterworths, London.
- Lazcano-Días del Castillo, S. (2001). "Sismicidad Histórica de Guadalajara, Jal." *XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.
- Mahood, G. A. (1977). "Preliminary report on the Comenditic Dome and Ash Flow Complex of Sierra La Primavera, Jalisco". *Revista del Instituto de Geología*, Vol. 1:177-190.
- Mahood, G. A. & Halliday, A. N. (1988). "Generation of high-silica rhyolite: A Nd, Sr, and O isotopic study of Sierra La Primavera, Mexican Neovolcanic Belt". *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 100:183-191.
- Proctor, R. (1933). *The Design and Construction of Rolled Earth Dams*.
- Saborio-Ulloa, J. (1998). "Algunas características del subsuelo de la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México." *Universidad de Guadalajara*.