

Correlación entre ángulo de fricción interna y peso volumétrico seco para las arenas pumíticas de la zona metropolitana de Guadalajara

CORRELATION BETWEEN INTERNAL FRICTION ANGLE AND DRY DENSITY FOR PUMICE SAND OF GUADALAJARA METROPOLITAN ZONE

David VARGAS-DEL-RÍO¹, Gil Humberto OCHOA-GONZÁLEZ²

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

²Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO)

RESUMEN: La experimentación en mecánica de suelos se basa en estándares que son sumamente pertinentes para unificar criterios y tomar decisiones a partir de una plataforma común. Esta forma de atacar los problemas es muy útil cuando se trabaja con la mayoría de los suelos. Sin embargo, puede dar lugar a resultados muy imprecisos cuando se trabaja con suelos atípicos. Este es el caso de los suelos pumíticos de la zona metropolitana de Guadalajara, donde una tradición poco fundamentada favorece la evaluación de la resistencia al esfuerzo cortante con base en correlaciones con la prueba de penetración estándar, que después son reducidas por "criterios ingenieriles". Con el fin de detectar los factores que más influyen en la resistencia al esfuerzo cortante y generar una correlación que permita determinarlo con pruebas simples y económicas, realizamos un experimento de regresión multivariable con pruebas de corte directo. Con base en la teoría de Mohr-Coulomb, se presentan los factores que más influyen en el ángulo de fricción interna y se presenta una formulación que relaciona el ángulo de fricción interna y el peso volumétrico seco, con un alto factor de correlación.

ABSTRACT: Experimentation in soil mechanics is based on standards that are highly relevant to unify criteria and make decisions from a common platform. This way of attacking problems is very useful when working with most soils. However, it can lead to very inaccurate results when working with atypical soils. This is the case of pumice soils of the metropolitan area of Guadalajara, where tradition promotes shear strength evaluation based on correlations with standard penetration test, and afterwards is reduced by "engineering criteria." In order to identify key factors that influence the shear strength of pumice soils and to generate a formulation that allows its evaluation with simple and inexpensive tests, we performed a multivariate regression experiment. Based on the Mohr-Coulomb theory, we present key factors that influence the angle of internal friction, and a formulation that correlate internal friction angle and dry density with a high coefficient of determination.

1 INTRODUCCIÓN

La investigación práctica que comúnmente se realiza en la mecánica de suelos está sujeta a estándares que son sumamente pertinentes para unificar criterios y tomar decisiones desde una plataforma común. Muchas de ellas están basadas en inferencias estadísticas o correlaciones que se obtienen a partir de una cierta población muestral, que permiten resolver problemas complejos con plan de exploración relativamente simple (Gutiérrez-Pulido y de-la-Vara-Salazar, 2003). Es el caso de la correlación que se utiliza para obtener la resistencia al esfuerzo cortante, con base en el número de golpes que se obtiene en la prueba de penetración estándar y que a su vez se correlaciona con el ángulo de fricción interna. Es un dato necesario para el cálculo de cimentaciones y el uso de esta correlación está muy extendido, con una literatura abundante que sustenta esta práctica (e.g. Hatanaka

y Uchida, 1996, Peck *et al.*, 1974, Wolf, 1989). Como sucede con todas las correlaciones, está sujeta a variaciones importantes debidas a la diferencia entre el tratamiento que se da a los datos en la práctica cotidiana y las condiciones en que fueron generadas (eficiencia de los equipos, personal que realiza la prueba, etc., ver e.g Seed *et al.*, 1985, Skempton, 1986). Pero los errores más graves ocurren cuando se trabaja con suelos "atípicos", es decir, suelos cuyas características son distintas a la población muestra que se utilizó como base para obtener las correlaciones. Este es el caso de la exploración con penetración estándar que se realiza habitualmente en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG). El subsuelo de la ZMG está constituido por limos, arenas y gravas de pómez dominante (mayor al 90%), caracterizado por su alta porosidad y ligereza, y por ser muy deleznable (Vargas-del-Río, 2005). Son, por tanto, suelos atípicos cuya resistencia al

esfuerzo cortante no debería de obtenerse a partir de las correlaciones existentes. Sin embargo, su uso está afianzado en el gremio: se utiliza alguna de las correlaciones entre número de golpes de penetración estándar y ángulo de fricción interna, y después se añade un factor de seguridad con base en el criterio particular del geotecnista.

Este trabajo presenta una correlación basada en un experimento de regresión multivariable que integra la variable de respuesta de la Resistencia al Esfuerzo Cortante versus las variables controladas de la Compacidad, Granulometría y Contenido de agua. Aunque aún falta trabajo por realizar, la correlación presentada es una base mejor fundamentada que la que se utiliza en el gremio — obtenida a partir de la prueba de penetración estándar— para obtener los parámetros necesarios para evaluar la resistencia al esfuerzo cortante. Son los primeros resultados de un diseño experimental que se está realizando en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), cuyo objetivo es encontrar correlaciones prácticas y económicas que sean útiles para la labor de la mecánica de suelos.

2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El experimento fue diseñado con el fin de obtener una correlación de uso práctico entre la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos pumíticos de la ZMG, y la compacidad, la granulometría y grado de saturación. Para ello se realizó un experimento de regresión multivariable con 3 variables controladas (Granulometría, Compacidad y Grado de Saturación), y una variable de respuesta (Ángulo de Fricción Interna), sin réplicas. Esto implicó 32 pruebas en total.

2.1 Hipótesis

La resistencia al esfuerzo cortante de los suelos de la ZMG está correlacionada con su compacidad, su granulometría y su contenido de agua.

2.2 Tratamiento de las variables

2.2.1 Variables controladas

A) Granulometría de los suelos: Se fabricaron 4 mezclas granulométricas equiespaciadas de acuerdo al diámetro de partícula promedio o D50. La granulometría más gruesa corresponde con las gravas mal graduadas (GP) o lapillis conocidas en la jerga de la construcción como “Jal”, mientras que la granulometría más fina corresponde a las cenizas volcánicas o limos inorgánicos (ML) conocidos en la jerga de la construcción como “Tepetate” (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1982). A partir de la mezcla de ambos, se obtuvieron los otros dos niveles intermedios (Bardet, 1997). Así, con base en la granulometría, se abarca

el espectro de suelos existentes en la ZMG (Saborio-Ulloa, 1998).

B) Compacidad de los suelos: Las muestras se compactaron en 4 niveles equiespaciados con base en el método Próctor (Bardet, 1997). El nivel más alto corresponde a la compacidad que se obtiene al compactar con la energía del método C de la prueba Próctor estándar 1557-91 (ASTM, D1557 - 12), el nivel más bajo es el que se genera por volteo, y los niveles intermedios se fabricaron artificialmente haciendo variar la energía por volumen. Como valor de medición se obtuvo el Peso Volumétrico Seco en Toneladas por metro cúbico. Así, con base en un tratamiento de compactación, se buscó abarcar el espectro de las compacidades existentes en la ZMG.

C) Grado de saturación: Las mezclas se saturaron en mayor o menor grado buscando que fueran cuatro niveles equiespaciados entre 0 y el 100%. Para ello se obtuvieron valores estimativos previos con base en un diagnóstico basado en sus relaciones volumétricas y gravimétricas, y sus variaciones al ser compactados.

2.2.2 Variable de respuesta:

Resistencia al Esfuerzo Cortante medido en la prueba de corte directo (Bardet, 1997). Se utilizó una presión confinante de 1 Kg /cm² y tal resistencia se atribuyó únicamente a la fricción intergranular o Ángulo de Fricción Interna, asumiendo que no existe cohesión importante y con base en el criterio de falla de Mohr-Coulomb (Mohr, 1900). Una asunción común cuando se trabaja con suelos arenosos.

3 RESULTADOS

Los resultados de las 32 pruebas arrojan ángulos de fricción interna máximos desde 31 hasta 62°, y ángulos de fricción residuales desde 30 hasta los 48°. Los pesos volumétricos secos varían entre 0.82 y 1.34 Ton/ m³. Como puede observarse en el análisis de varianza (tabla 1), el ángulo de fricción interna máximo se ve influido sólo por el peso volumétrico seco (PVS) y la granulometría (D50); no así por el grado de saturación (ver p-Valor). A partir de estos dos factores se explica el 97.8 % de la variación de los resultados (ver R-cuadrado). También, a partir del Estadístico T se observa que el peso volumétrico seco y la granulometría incrementan el ángulo de fricción interna. Es decir, que a medida que el suelo es más grueso y más compacto, mayor será su ángulo de fricción interna. Sin embargo, la influencia de la granulometría es considerablemente menor a la del Peso Volumétrico Seco.

Tabla 1. Análisis de Regresión Múltiple para el Ángulo de Fricción Interna, considerando el Peso Volumétrico Seco y la Granulometría

Variable dependiente: ϕ	Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	P-valor
------------------------------	-----------	------------	----------------	---------------	---------

PVS	0.350284	0.0237259	14.7575	0.0000
D50	5.10827	1.31525	3.88388	0.0005
Análisis de varianza				
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Coef-F
Modelo	80159.6	2	40079.8	666.00
Residuo	1805.39	30	60.1797	0.0000
Total	81965.0	32		
R ² = 97.7974 %				

Esta menor influencia de la granulometría (Estadístico T, tabla 1), comparada con la del Peso Volumétrico Seco, permite proponer un modelo más simple con un buen coeficiente de determinación (o R²) que sólo se reduce en un 1% (tabla 2).

Tabla 2. Análisis de Regresión Múltiple para el Ángulo de Fricción Interna, considerando únicamente el Peso Volumétrico Seco

Variable dependiente: ϕ				
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	P-valor
PVS	0430153	0.0142947	30.0917	0.0000
Análisis de varianza				
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Coef-F
Modelo	79251.8	1	79251.8	905.51
Residuo	2713.17	31	87.5217	0.0000
Total	81965.0	32		
R ² = 96.6898 %				

El modelo de regresión para este último análisis tiene un factor de confiabilidad superior al 95% y un coeficiente de determinación de 96.7%. De aquí surge una formulación sencilla que puede utilizarse para obtener el ángulo de fricción interna a partir de su Peso Volumétrico Seco:

$$\phi = 43 \times \text{PVS}$$

4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El ángulo de fricción interna de los suelos pumíticos de la ZMG, como valor determinante de su resistencia al esfuerzo cortante, puede obtenerse multiplicando por 43 el Peso Volumétrico Seco (en Toneladas / m³): $\phi = 43$ (PVS). Se trata de una correlación empírica sencilla de obtener, que considera las dispersiones debidas al contenido de agua y su variación granulométrica. Contrastando este modelo o fórmula, que explica el 96.7% de la variación de los datos, contra la forma actual de obtenerlo en el gremio, se infiere una forma

considerablemente más confiable de obtener el ángulo de fricción interna. Sin embargo, la fórmula no considera el efecto de la cohesión y esta es una omisión importante. Además, a medida que aumenta la profundidad de muestreo es más complicado obtener un Peso Volumétrico Seco confiable, por lo que no sustituye a la prueba de penetración estándar. De ahí que se desprendan dos futuras líneas de investigación: la primera que deberá evaluar el efecto de la cohesión en el modelo, y la segunda que permita correlacionarla con el número de golpes en la prueba de penetración estándar.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials 1982. *Astm book of standards, sec. 4.*, West Conshohocken, PA., ASTM.
- Astm D1557 - 12. *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kn-m/m³))*, American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Bardet, Jean-Pierre 1997. *Experimental soil mechanics*, New Jersey, Prentice-Hall Inc.
- Gutiérrez-Pulido, Humberto y De-La-Vara-Salazar, Román 2003. *Análisis y diseño de experimentos*, México, McGraw Hill.
- Hatanaka, M. J y Uchida, A 1996. Empirical correlations between penetration resistance and interna friction angle of sandy soils. *Soils and foundations*, 36, 1-10.
- Mohr, O. 1900. Welche umstände bedingen die elastizitätsgrenze und den bruch eines materiales? *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 44, 1524-1530, 1572-1577.
- Peck, R. B., Hanson, W. E. y Thornburn, T. H. 1974. *Foundation engineering*, New York, Wiley.
- Saborio-Ulloa, Javier 1998. *Algunas características del subsuelo de la ciudad de guadalajara, jalisco, méxico*, Guadalajara, Universidad de Guadalajara.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. y Chung, R. M. 1985. Influence of spt procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 111, 1425-1445.
- Skempton, A. W. 1986. Standard penetration test procedures and the effect in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation. *Geotechnique*, 36, 425-447.

Vargas-Del-Río, David 2005. Actividad puzolánica de las tobas pumíticas de la zona metropolitana de guadalajara. *e-Gnosis*, 3.

Wolf, T. F. 1989. Pile capacity prediction using parameter functions *Predicted and Observed Axial Behaviour of Piles, Results of a Pile Prediction Symposium*. Evanston: Geotechnical Engineering Division, ASCE.