

## Suelos pumíticos: suelos no-convencionales

### Pumice soils: non-conventional soils

Salvador LAZCANO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Consultor geotécnico, director de Suelo-Estructura y profesor en las Universidades ITESO y Panamericana campus Guadalajara

**RESUMEN:** Guadalajara es la ciudad con mayor población del mundo, que está desplantada mayoritariamente sobre suelos pumíticos, y el importante crecimiento que ha alcanzado representa un reto a la ingeniería geotécnica, para tener un mayor conocimiento de las propiedades del suelo. El objetivo del presente artículo es mostrar algunas características particulares de estos suelos pumíticos y con ellos proponer modificaciones a la práctica geotécnica. Las particularidades que se analizan van desde su origen geológico, propiedades de las partículas de suelo, compresibilidad y resistencia al cortante. Finalmente se analizan algunos de los aspectos de la práctica geotécnica cotidiana a la luz de esto y se sugieren cambios en la misma.

**ABSTRACT:** Guadalajara is the largest city in the world located mainly over pumice soils. Its fast growth is a defiance for the geotechnical engineering, in order to have a deeper knowledge of their soil properties. The objective of this paper is to show some peculiarities of these pumice soils, and with that information, propose changes in the geotechnical practice. Peculiarities go from their geological origin, soil particle properties, compressibility and shear strength. Finally, some aspects of the geotechnical practice are analyzed under those peculiarities, and some changes are proposed.

## 1 INTRODUCCIÓN

El actual asentamiento de la ciudad de Guadalajara se determinó en 1542, después de tres accidentadas fundaciones anteriores, siendo la primera en 1531. Se decidió establecer Guadalajara en el sitio que actualmente ocupa, dentro del valle de Atemajac, por contar con planicies grandes de terreno y agua, aunque no abundante, si necesaria para los requerimientos de aquella naciente ciudad (Lazcano, 2004).

A partir de aquella pequeña Guadalajara de 1542 con pocas decenas de habitantes, ha habido un crecimiento exponencial, sobre todo desde finales del siglo XIX. Actualmente el área metropolitana cuenta con alrededor de cinco millones de habitantes y abarca cerca de 800 km<sup>2</sup>. De esta área total, la mayor parte se ubica en aquellas planicies que visualizaron los fundadores, y que actualmente se les llama los valles de Atemajac, Tesistán y Toluquilla, cuyo subsuelo está constituidos por suelos pumíticos, originados en erupciones de la Sierra La Primavera, ubicada hacia el oeste de la zona centro.

Los suelos pumíticos de Guadalajara han sido motivo de varios mitos que los idealizan, entre ellos el erróneo y centenario concepto de ser “colchón ante sismos” (Waitz y Urbina, 1919; Lazcano, 2004). Por otro lado, en la práctica

de la ingeniería geotécnica han sido tratados como si fueran suelos promedio o convencionales, a pesar de tener varias características particulares.

El objetivo del presente artículo es mostrar algunas características particulares de estos suelos y proponer cambios en la práctica geotécnica en Guadalajara.

Dado que se ha hecho poca investigación local, en la elaboración de este trabajo se complementó con experiencias en otros lugares del mundo.

Este artículo consta de tres partes: se inicia con el panorama geológico regional, que dio origen a los suelos pumíticos; enseguida se presentan algunas de las particularidades más importantes de los suelos pumíticos; finalmente se hace una revisión de la práctica geotécnica en Guadalajara y se proponen cambios en la misma.

## 2 ANTECEDENTES GEOLOGICOS

Hace aproximadamente 125,000 años, en la región en donde se ubica Guadalajara inició un período de actividad volcánica, en la zona que hoy es conocida como Sierra La Primavera, a unos 13 km al oeste del centro histórico. A diferencia del vulcanismo anterior en la región, que había consistido en flujos de lavas basáltico-andesíticas, de composición mineralógica ferro-magnesiánica y con colores oscuros, ese nuevo período volcánico emitió lava riolítica y piroclastos de color claro, por su composición mineralógica

con alto contenido de cuarzo y feldespatos. Esta actividad volcánica inició hace 125,000 años, ha tenido diferentes etapas eruptivas y actualmente su actividad se reduce a algunos manantiales de aguas termales y fumarolas.

Mahood (1980) estableció cinco principales períodos eruptivos de la caldera riolítica de La Primavera: el primero hace alrededor de 125 mil años y el segundo hace 95 mil años, durante el cual hubo una potente erupción explosiva con emisión de piroclásticos que constituyeron una formación llamada toba “Tala”, debido a que aflora en el cercano valle de ese nombre, aunque también se encuentra en parte del subsuelo de Guadalajara. Por la intensa emisión explosiva de material piroclástico (pómez) en este segundo período, la cámara magmática se vació parcialmente, se colapsó la bóveda y ello dio origen a un lago circular de unos 11 km de diámetro, en el centro de la caldera.

Entre el segundo y tercer período eruptivo hubo la recarga de la cámara magmática y con ello el levantamiento del fondo del lago, que terminó drenando radialmente. Y con ello vino el tercer período hace 75 mil años y después un cuarto hace 65 mil años, que formó varios domos volcánicos, entre ellos cerro El Tajo.

En el quinto período eruptivo fue hace unos 25 a 30 mil años, el material expulsado fue pequeño, en comparación con períodos anteriores, y se formó únicamente el domo llamado cerro el Colli.

Los productos piroclásticos emitidos por la caldera riolítica de la Sierra La Primavera son cenizas volcánicas de color café a gris claro, debido a que sus componentes mineralógicos son silicato y aluminio (Mahood, 1981). En erupciones explosivas la lava líquida es arrojada al aire como espuma y al enfriarse rápidamente quedan partículas con estructura esponjosa, en ocasiones fibrosa, ligeras y más fáciles de ser triturados que los suelos promedio o convencionales. A este material piroclástico se le llama suelo pumítico, pómez, pumita o pumicita, y se encuentran en la naturaleza en un amplio rango de tamaños de partículas, desde finos (partículas que pasan por la malla No. 200) hasta boleos y bloques de dos o más metros, como los que se pueden observar en los depósitos del fondo del lago que hubo hace entre 95 y 75 mil años.

Este proceso que origina los suelos pumíticos marca una notable diferencia contra los suelos convencionales. La mayoría de los suelos son producto del intemperismo o meteorización de rocas, combinado con diferentes procesos de transportación. Se van fragmentando las rocas formando primero bloques rocosos, enseguida boleos, gravas, arenas y finalmente suelos finos limosos o arcillosos. Estos suelos promedio son transportados por agua, viento o gravedad, que les provoca desgaste adicional al intemperismo, y posteriormente son depositados. En contraparte, los suelos pumíticos “nacen” a la corteza terrestre como suelos con granulometrías variables, se transportan por el aire, y después se depositan en la superficie terrestre o en algún

cuerpo de agua. Eventualmente pueden a su vez ser transportados y depositados.

En el subsuelo de Guadalajara hay depósitos pomez con espesores que varían de unos pocos metros hasta unos 100 m en algunas partes del poniente de Guadalajara (Lazcano 2004 y 2012). Su granulometría fluctúa desde suelos finos hasta gravas, llamadas localmente jales, pasando por el rango de las arenas. A las arenas gruesas y gravas finas se les llama jalecillo. Sin embargo, el rango de partículas predominante en Guadalajara son arenas, con poco a algo de grava (jal) y no más de 15% de finos limosos.

Si bien los suelos pumíticos no abundan, sí se encuentran en varias partes del mundo, en donde ha habido vulcanismo con emisiones riolíticas explosivas, por ejemplo, en la erupción del año 79 del volcán Vesubio, que sepultó Pompeya y otras poblaciones. En México, además de Guadalajara, hay suelos pumíticos en la región de Tepic, así como en varios estados del oeste de Estados Unidos, en Guatemala, El Salvador, Ecuador, Chile, Argentina, Islandia, Italia, Grecia, Turquía, Tanzania, Etiopía, Irán, Nueva Zelanda, Filipinas, China y Japón, entre otros (USGS, 2012).

### 3 ALGUNAS PARTICULARIDADES DE LOS SUELOS PUMÍTICOS

A continuación se plantean tres aspectos importantes, aunque no únicos, que imprimen un carácter especial a los suelos pumíticos, pómez o pumicita, que los diferencian de los suelos comunes o convencionales. Primeramente se analizarán algunas características de las partículas y luego la compresibilidad y finalmente la resistencia al cortante.

Como la granulometría de los suelos pumítico está dentro del rango de las arenas, sus características se compararán con arenas cuarzosas, que son las que abundan en la naturaleza.

#### 3.1 Características de las partículas

Además de las diferencias en su origen geológico entre los suelos pumíticos y los convencionales, también hay variaciones en las propiedades de las partículas que los conforman. Estas son producto de erupciones volcánicas explosivas riolíticas, mineralógicamente hablando ricas en cuarzo (silicato de aluminio), como se mencionó en el punto anterior. Por su enfriamiento rápido al ser expulsadas a la atmósfera, tienen una densa red de finas oquedades, algunas interconectadas y abiertas a la superficie, mientras que otras están aisladas en el interior de las partículas. Como consecuencia, se tienen suelos ligeros, con superficies rugosas y más triturables que las arenas cuarzosas convencionales (Lazcano 2010; Wesley, 2010).

Para el estudio de partículas de suelos pumíticos, ha sido de gran ayuda el uso del microscopio electrónico de barrido (SEM por su nombre en inglés: scanning electron

microscope). Con las imágenes así obtenidas se observó que conforme el tamaño de las partículas disminuye, la forma y textura de la superficie tiende a ser menos uniforme y más angulosa. Además, se observó que cuando las partículas son trituradas, su superficie se vuelve más irregular y dentada, facilitando así mayor trabazón entre partículas, al ser sometidas a esfuerzos cortantes (Orense y Pender, 2016).

Una técnica aún más moderna que el microscopio electrónico de barrido es la microtomografía computarizada de rayos X. Con ella se pueden obtener imágenes de estructuras internas de pequeños objetos (como pueden ser pequeñas partículas de pómez), de forma no destructiva. Estos estudios constataron que los suelos pumíticos tienen un importante volumen de vacíos en su interior y que la mayoría de ellos se comunican al exterior. La relación de volumen de vacíos internos (sin comunicación al exterior) al volumen de sólidos de suelos pumíticos en la zona de Auckland, en Nueva Zelanda fluctúa entre  $10^{-5}$  y  $10^{-2}$ , con valor promedio de 0.006 (Orense y Pender, 2016).

### 3.2 Triturabilidad de partículas

La triturabilidad es la más importante particularidad de los suelos pumíticos. La trituración de partículas provoca cambios en la densidad, aumento en la compresibilidad del depósito de suelos y reducción en la resistencia al esfuerzo cortante.

En minuciosas pruebas de trituración se encontró que la resistencia a la trituración se reduce, tanto de arenas convencionales como pumíticas, conforme aumenta el tamaño de partículas. Además, se encontró que el esfuerzo de trituración de arenas pumíticas es alrededor de diez veces menor que el de arenas sílicas (Orense y Pender, 2016), como se puede ver en la Figura 1.

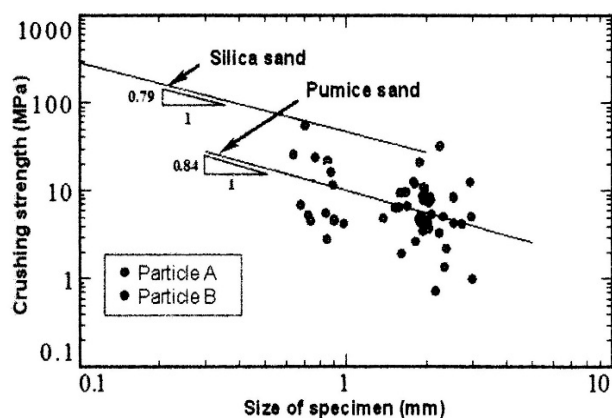


Figura 1. Variación de la triturabilidad de arenas pumíticas y sílicas en función de esfuerzos y tamaños de partículas (Orense y Pender, 2016).

La trituración de pómez se debe principalmente a la aplicación de esfuerzos cortantes, más que esfuerzos por consolidación (Orense *et al.*, 2012).

### 3.3 Compresibilidad

Se realizaron en consolidómetro convencional pruebas comparativas para evaluar la compresibilidad de arenas pumíticas y cuarzosas, con granulometrías similares y en estados suelto y denso. Los resultados se presentan en la Figura 2 y es notable el contrastante grado de compresibilidad, unas cuatro a cinco veces mayor en el caso de las arenas pumíticas, tanto para el caso de estado suelto como denso (Wesley *et al.*, 1999).

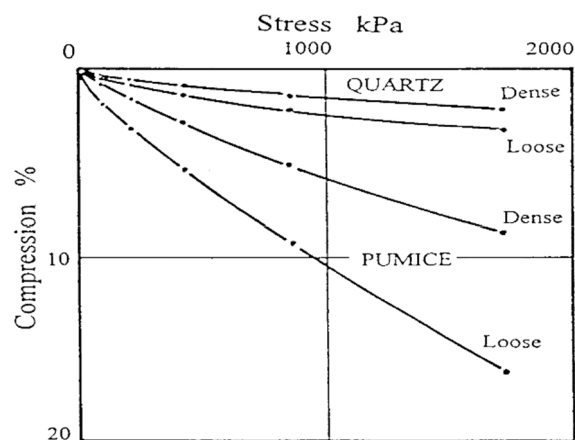


Figura 2. Compresibilidad de arenas cuarzosas y pumíticas, en estados sueltos y densos (Wesley *et al.*, 1999).

En un estudio comparativo entre arenas pumíticas de Nueva Zelanda y Japón se encontraron propiedades similares, a pesar de diferencias en su origen y granulometría (Kikkawa *et al.*, 2013).

Hay pocos reportes de valores de índices de compresión ( $C_c$ ) en suelos pumíticos y sus rangos van de 0.7 (Pender *et al.*, 2006) a 1.17 (González Pulgar, 2012). Estos valores los sitúa dentro de suelos de alta compresibilidad.

### 3.4 Resistencia al cortante

Con las mismas arenas pumíticas y cuarzosas mencionadas en la sección anterior, con granulometrías similares y en estados suelto y denso, se realizaron pruebas triaxiales. En la Figura 3 se presentan las gráficas esfuerzo-deformación para presiones de confinamiento de 50 y 300 kPa. Para el confinamiento bajo, tanto la arena pumítica como la cuarzosa en estado denso muestran un comportamiento convencional con un pico en el esfuerzo desviador. Para la presión de confinamiento alta la arena cuarzosa sigue presentando un pico, aunque no tan marcado, pero la arena pumítica no. Pero el resultado más

interesante consiste en que mientras en la arena cuarzosa se midieron ángulos de fricción interna ( $\phi$ ) de  $36.5^\circ$  y  $41^\circ$ , para los estados suelto y denso respectivamente, en la arena pumítica el ángulo de fricción interna de  $41.5^\circ$ , tanto para el estado suelto como denso (Wesley *et al.*, 1999).

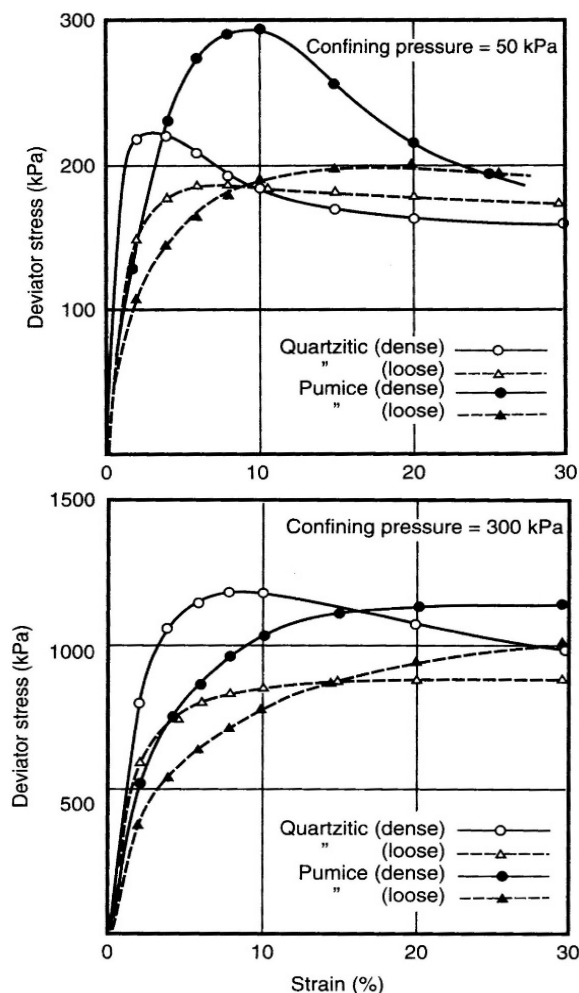


Figura 3. Gráficas esfuerzo-deformación de arenas pumíticas y cuarzosas, en estados suelto y denso, bajo una presión de confinamiento de 50 kPa (a) y 300 kPa (b).

Los altos ángulos de fricción interna ( $\phi$ ) en los suelos pumíticos están asociados a lo rugoso y dentado de la superficie de las partículas y a sus formas muy angulosas, así como a su triturabilidad, que favorece el aumento de la trabazón de las partículas, al ser sometidas a esfuerzos cortantes (Orense y Pender, 2016). Esto mismo dificulta alcanzar el estado crítico, a pesar de que se trabajen las pruebas a deformaciones grandes (Pender *et al.*, 2006). Por lo tanto, no es fácil definir con precisión los ángulos de fricción interna (Kikkawa *et al.*, 2013). A continuación, se presentan algunos valores de ángulos de fricción interna ( $\phi$ ) en pómez, obtenidos en diferentes lugares y con diversos tipos de pruebas de laboratorio.

Autor	Lugar	Prueba	$\phi$
Saborio <i>et al.</i> , 1970	Guadalajara	Tiaxial y corte directo	$35 - 40^\circ$
Hess y Padilla, 1986		Corte directo	$41 - 42^\circ$
Bommer <i>et al.</i> , 2001	San Salvador	Tiaxial	$35 - 40^\circ$
González Pulgar, 2012	Santiago de Chile	Triaxial	$47^\circ$
Aversa <i>et al.</i> , 2013	Nápoles, Italia	Triaxial	$35 - 38^\circ$
Bucher, 1998	Tanzania	Corte directo	$44.5 - 46^\circ$
		Tiaxial	$43^\circ$
Wesley <i>et al.</i> , 1999	Nueva Zelanda	Tiaxial	$41.5^\circ$
Pender <i>et al.</i> , 2006			$40 - 42^\circ$
Orense <i>et al.</i> , 2012			$42 - 44^\circ$
Orense <i>et al.</i> , 2006	Filipinas	Torsión anular	$40^\circ$

Así, el rango de valores de ángulos de fricción interna ( $\phi$ ) fluctúa entre  $35^\circ$  y  $46^\circ$ , que son comparativamente altos respecto a las arenas convencionales. Pero lo más interesante es que los ángulos de fricción interna en suelos pumíticos parecen ser independientes de sus compacidades (Wesley, 2010).

#### 4 PRÁCTICA GEOTÉCNICA ACTUAL

Tomando en consideración las diferencias aquí planteadas entre los suelos pumíticos y los comunes o convencionales, es evidente la necesidad de revisar la práctica cotidiana de las pruebas de campo y laboratorio, y el análisis geotécnico.

Iniciando desde la sencilla prueba de determinación de contenidos de humedad, debe tomarse que cuenta que parte del agua está entre las partículas y parte dentro de los huecos de las partículas, situación que no se da en los suelos promedio. Esto impacta incluso en la determinación de los límites de consistencia (Saborio, 1998).

Por lo que respecta a las granulometrías, que con tanta intensidad comúnmente se realizan, desde el mismo proceso de obtención y preparación de las muestras mediante disgregación, se reduce ficticiamente los tamaños de pómez (Hess y Padilla, 1986; Saborio, 1998). También el proceso dinámico de la criba así como la duración de la misma, altera la granulometría real del suelo. Hess y Padilla (1986), con base en experiencias en suelos pumíticos de Guadalajara, sugieren que, en vez del cotidiano análisis granulométrico, se haga una descripción física del material.

Las pruebas Proctor de uso cotidiano en el monitoreo de calidad de compactaciones, tritura de manera considerable los suelos pumíticos, y lo realiza de forma diferente a como lo hacen los equipos de compactación en la obra (Hess y Padilla, 1986; Saborio, 1998). Así, en realidad se tienen dos suelos con granulometrías diferente, por lo que es de

dudosa utilidad la comparación entre ellos. Esto es causa de dificultad en alcanzar determinado grado de compactación en campo. Por eso, sería conveniente que en vez del marco de referencia Proctor, en arenas, y más aún en gravas pumíticas (localmente llamadas jales), la calidad de las compactaciones se acote en términos de densidad relativa (Hess y Padilla, 1986).

En lo referente a pruebas de campo, Wesley *et al.* (1999) encontraron, mediante pruebas en un tanque en laboratorio, que la triturabilidad de los suelos pumíticos ocasiona que los resultados de pruebas de cono estático sean incapaces de registrar cambios en las densidades relativas, como si lo hacen en arena convencionales (ver Figura 4). Así, es cuestionable interpretar resistencias de cono en arenas pumíticas, como si fueran arenas comunes.

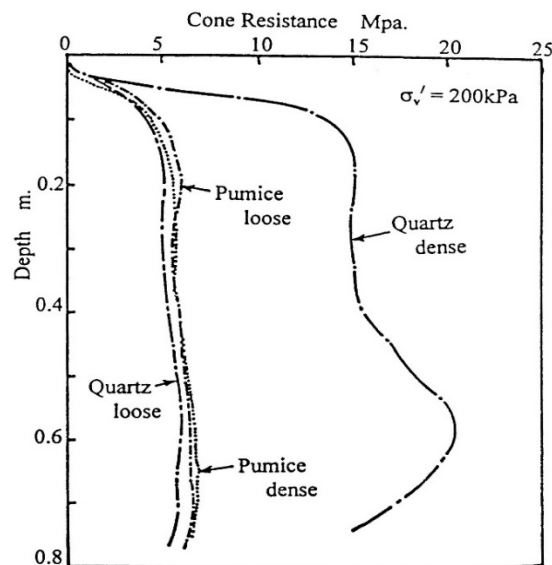


Figura 4. Resistencias de cono estático (CPT) contra profundidad, en muestras de arena pumítica y cuarzosa colocada en un tanque en laboratorio, en estado suelto y denso, y aplicando una presión de confinamiento de 200 kPa (Wesley *et al.*, 1999).

Si es de dudosa confiabilidad determinar en pómez las compacidades relativas y con ellas los ángulos de fricción interna ( $\phi$ ) con cono estático, mayor es la incertidumbre con las pruebas de penetración estándar o cono dinámico por las altas cargas dinámicas que aplican (Saborio, 1998; Lazcano, 2007, 2010 y 2016). De las experiencias con los suelos pumíticos en San Salvador, Faccioli, *et al.* (1989) concluyó que la prueba de penetración estándar subestima las propiedades de los suelos pumíticos, por la trituración de las partículas, además del posible rompimiento de algún grado de cementación que pudiera haber. El mismo Faccioli *et al.* (1989), así como otros (Jamiolkowski y Robertson, 1988; Lazcano, 2007, 2010 y 2016; Orense *et al.*, 2012), sugieren que para la caracterización de suelos pumíticos se

considere la determinación de velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) y corte ( $V_s$ ).

Conocida la variación de la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) en un suelo, es posible determinar los módulos de rigidez al cortante ( $G_0$ ) y con ello se pudieran realizar análisis geotécnicos (Jamiolkowski y Robertson, 1988). Quizá esto sea conveniente, particularmente en suelos pumíticos (Lazcano, 2007, 2010 y 2016).

## 5 CONCLUSIONES

- Los suelos comunes o convencionales “nacen” en la corteza terrestre a partir de un largo proceso de intemperismo de rocas. Los suelos pumíticos desde un principio “nacen” como suelos, en erupciones explosivas de magma riolítico.
- Las partículas de los suelos pumíticos, pómez o pumicita, tienen una estructura esponjosa, en ocasiones fibrosa, que los hace ligeros y más fáciles de ser triturados que los suelos convencionales.
- Sus compresibilidades, al igual que sus ángulos de fricción interna ( $\phi$ ), son mayores que los suelos convencionales.
- Los ángulos de fricción interna ( $\phi$ ) son difíciles de evaluar, pero independientes de las compacidades (Wesley *et al.*, 1999).
- Pruebas de laboratorio como los contenidos de humedad, límites de consistencia, granulometrías, pruebas Proctor, entre otras, deben analizarse con cautela o de preferencia modificarse, para que sean de verdadera utilidad en los suelos pumíticos (Hess y Padilla, 1986).
- Resultados de pruebas de cono estático, dinámico o de penetración estándar, deben verse con cautela y de preferencia complementarse con otros estudios, como pudiera ser la determinación de velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) y corte ( $V_s$ ) (Jamiolkowski y Robertson, 1988; Faccioli *et al.*, 1989; Lazcano, 2007, 2010 y 2016; Orense *et al.*, 2012).
- Como un complemento al análisis geotécnico en suelos pumíticos con base en los altos e inciertos ángulos de fricción interna, conviene buscar otras alternativas, como pudiera ser el módulo máximo de rigidez al cortante ( $G_0$ ), que se pueden obtener de las velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) (Jamiolkowski y Robertson, 1988; Lazcano, 2007, 2010 y 2016).
- Por todo lo anterior, es evidente que los suelos pumíticos son suelos no-convencionales, por lo que debe tenerse cautela con las aplicaciones de diversas pruebas y criterios de análisis usados en suelos convencionales.

## REFERENCIAS

- Aversa, S., Evangelista, A. y Scotto di Santolo, A. (2013). "Influence of the subsoil on the urban development of Napoli", *Proc. Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites*, Taylor & Francis Group, Londres: 15-44.
- Bommer, J.J., Rolo, R., Mitroulia, A. y Berdousis, P. (2001). "Geotechnical properties and seismic slope stability of volcanic soils", *12<sup>th</sup> European Conf. on Earthquake Engr.*
- Bucher, F. (1998). "Instability of volcanic soils with layers of pumice gravel", *Proc. Inter. Sympo. on Problematic Soils*.
- de Lange, W., Moon, V. y Healy, T. (1991). "Problems with predicting the transport of pumiceous sediments in the coastal environment", *Coastal Sediments*: 990-996.
- Esposito, L. y Guadagno, F.M. (1998). "Some special geotechnical properties of pumice deposits", *Bull. Eng. Geology Environmental*, 57: 41-50.
- Faccioli, E., Battistella, C., Alemani, P., Lo Presti, D. y Tibaldi, A. (1989). "Seismic Microzoning and Soil Dynamic Studies in San Salvador", *Earthquake Geotechnical Engineering, 12<sup>th</sup> Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Río de Janeiro, Brasil.
- González Pulgar, C.A. (2012). "Propiedades geomecánicas de dos suelos de origen volcánico", *Tesis de Maestría*, Universidad de Chile.
- Hess, J.W. y Padilla, M. (1986). "Testing and geotechnical evaluation of pumice soils", *22<sup>nd</sup> Biannual Symposium on Engineering Geology and Soils Engineering*.
- Jamiolkowski, M. y Robertson, P.K. (1988). "Future trends for penetration testing", *Proc. Penetration testing in the UK*, Thomas Telford, Londres: 321-342.
- Kikkawa, N., Pender, M.J. y Orense, R.P. (2013). "Comparison of the geotechnical properties of pumice sand from Japan and New Zealand", *Proc. 18<sup>th</sup> Inter. Conf. Soil Mech. and Geotechnical Eng.*, París, Vol. 1: 239-242.
- Konagai, K., Johansson, J., Mayorca, P., Yamamoto, T., Miyajima, M., Uzuoka, R., Pulido, E., Duran, F., Sassa, K. y Fukuoka, H. (2002). "Las colinas landslide caused by the January 13, 2001 off the coast of El Salvador earthquake", *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol. 2, No. 1.
- Lazcano, S. (2004). "Contexto histórico y geotécnico de Guadalajara", *Memorias XXII Reunión Nacional Mec. Suelos*, Publicación SMMS, Guadalajara, Jal., Tomo 1: 53-66.
- Lazcano, S. (2007). "Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie", En Rodríguez, C. y Gutiérrez L. (coordinadores) (2017). *Reflexiones de la Academia de Ingeniería, Región Occidente*. Universidad de Guadalajara y Academia de Ingeniería, Guadalajara, Jal.: 269-301.
- Lazcano, S. (2010). "Experiences in pumice soil characterization by surface wave analysis", *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Eng. and soil dynamics*, San Diego, E.U.A., artículo No. 1.28b.
- Lazcano, S. (2016). "Cimentación de la Catedral de Guadalajara: enseñanzas y retos", *Memorias XXVIII Reunión Nacional de Ing. Geotécnica*, Publicación SMIG, Mérida, Yuc.
- Mahood, G.A. (1980). "Geological Evolution of a Pleistocene Rhyolitic Center – Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico", *Jour. Volcanology and Geothermal Research*, 8: 199-230.
- Mahood, G.A. (1981). "The chemical evolution of a late Pleistocene rhyolitic center: the Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 77: 129-149.
- Orense, R.P., Zapata, A., Hata, A. y Towhata, I. (2006). "Geotechnical characteristics of volcanic soils taken from recent eruptions", *Geotechnical and Geological Engineering*, 24: 129-161.
- Orense, R.P., Pender M.J. y O'Sullivan A.S. (2012). Liquefaction Characteristics of Pumice Sands. *EQC Project 10/589, The University of Auckland*.
- Orense, R.P. y Pender, M.J. (2016). "From micro to macro: An investigation of the geomechanical behaviour of pumice sand", *Proc. Inter. Workshop on volcanic rocks and soils*, CRC Press, Ischia, Italia: 45-62.
- Pender, M.J. (2006). "Stress relaxation and particle crushing effects during Ko compression of pumice sand", *Proc. Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media*, Taylor & Francis Group, Londres: 91-96.
- Pender, M.J., Wesley, L.D., Larkin, T.J. y Pranjoto, S. (2006). "Geotechnical properties of a pumice sand", *Soils and Foundations*, 46(1): 69-81.
- Pender, M.J., Orense, R.P. y Kikkawa, N. (2014). "Japanese and New Zealand pumice sands: Comparison of particle shapes and surface void structures", *Proc. TC105 ISSMGE International Sympo. On Geomechanics from micro to macro*, IS-Cambridge 2014, 2: 1111-1116.
- Saborio, J. (1998) Algunas características del subsuelo de la ciudad de Guadalajara, Jal. México, *División de Ingenierías CUCEI U. de G.*
- Saborio, J., Gómez Tremari, R., Muro, J., Girault, P. (1970). "Problemas de cimentación en Guadalajara", *Memorias V Reunión Nacional Mec. Suelos*, Publicación SMMS, México, Tomo I.
- Senetakis, K., Anastasiadis, A., Pitilakis, K., Coop, M.R. (2013). "The dynamics of pumice granular soil in dry state under isotropic resonant column testing", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 45: 70-79.
- USGS (United States Geological Service) (2012). "2011 Minerals Yearbook / Pumice and Pumicite".
- Waitz, P. y Urbina, F., (1919). "Los Temblores de Guadalajara en 1912", *Instituto Geológico de México*, Boletín No. 19.
- Wesley, L.D. (2001). "Determination of specific gravity and void ratio of pumice materials", *Geotechnical Testing Journal*, 24 (3): 418-422.
- Wesley, L.D. (2010). *Geotechnical Engineering in Residual Soils*, John Wiley & Sons, Nueva Jersey: 249 p.
- Wesley, L.D., Meyer, V.M., Pranjoto, S., Pender, M.J., Larking, T.J. y Duske, G.C. (1999). "Engineering Properties of a Pumice Sand", *Proc. 8<sup>th</sup> Australian-NZ Conf. on Geomechanics*, Hobart, Vol. 2: 901-908.
- Whitham, A.G. y Sparks, R.S.J. (1986). "Pumice", *Bulletin of Volcanology*, 48: 209-223.
- Yildiz, M. y Soganci, A.S. (2012). "Geotechnical characteristics of granular pumice soils in Nevsehir region", *3<sup>rd</sup> Int. Conf. on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Chipre: 447-454.
- Zamudio, P., Vargas, D. y Ochoa, G. (2016). "Correlaciones entre propiedades mecánicas y propiedades físicas en suelos pumíticos no saturados", *Memorias XXVIII Reunión Nacional Ing. Geotécnica*, Publicación SMIG, Mérida, Yuc.