



Diseño de terraplenes ligeros para control de asentamientos

Design of light embankments for settlements control

Auvinet-Guichard Gabriel

Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Ingeniería

Correo: gauvinetg@iingen.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4674-1659>

Sánchez-Guzmán Jesús

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores Aragón

Correo: sangjesus@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2214-8156>

Resumen

Diversos estudios relativos a la porosidad de los materiales granulares muestran, a partir de consideraciones teóricas, modelos físicos y simulaciones numéricas, que los materiales uniformes presentan naturalmente un peso volumétrico menor que los materiales bien graduados. Lo anterior puede aprovecharse para construir terraplenes ligeros con asentamientos controlados sobre suelos de alta compresibilidad como las arcillas lacustres del valle de México. Para reducir aún más el peso del terraplén es posible recurrir a materiales granulares naturalmente ligeros como la escoria volcánica conocida localmente en México como *tezontle*, este se caracteriza por sus granos porosos y su bajo peso volumétrico. En este trabajo se analizan las características de dos *tezontles*, el primero bien graduado y el otro con granulometría más uniforme. Se propone finalmente una técnica constructiva que recurre a *tezontle* con granulometría controlada para la construcción de terraplenes ligeros sobre suelos blandos como los del valle de México.

Descriptores: Materiales granulares, granulometría, porosidad, peso volumétrico, escoria volcánica.

Abstract

Several existing studies on the porosity of granular materials based on theoretical considerations, physical models or numerical simulations show that uniform materials naturally present a lower unit weight than well-graded ones. This can be taken advantage of to build light embankments with controlled settlements on high compressibility soils such as the lacustrine clays of the valley of Mexico. To further reduce the weight of the embankment it is possible to resort to naturally light granular materials with porous grains such as the volcanic slag locally known in Mexico as *tezontle* that is characterized by its low unit weight. This paper analyzes the characteristics of two materials classified respectively as uniform and well-graded *tezontles*. Finally, a constructive technique using *tezontle* with controlled grain size distribution is proposed for the construction of light embankments on soft soils such as those in the Valley of Mexico.

Keywords: Granular materials, grain size distribution, porosity, unit weight, volcanic slag.

INTRODUCCIÓN

Al diseñar terraplenes sobre suelos blandos compresibles, es recomendable emplear un material de construcción de alta porosidad y bajo peso volumétrico para evitar que se presenten asentamientos excesivos. Esta disminución de los asentamientos permite a su vez reducir la altura del terraplén requerido para alcanzar la elevación de proyecto de la rasante, lo que conduce a una disminución adicional de los asentamientos.

Este trabajo revisa diversos estudios existentes respecto a la variación de la porosidad de un material granular con sus características granulométricas.

Por otra parte, se recurre a simulaciones numéricas de muestras granulares para estimar los valores de la porosidad que es posible alcanzar con escorias volcánicas ligeras conocidas en México localmente como *tezontle*. Algunas características físicas del *tezontle*, como el peso volumétrico de los granos y el ángulo de reposo observado en los conos volcánicos se obtienen de la literatura. Los parámetros para describir la interacción entre los granos de este material se obtienen por calibración de simulaciones con el Método de Elementos Discretos.

Se presenta finalmente una técnica constructiva que fue propuesta para pistas de aeropuerto sobre suelos blandos (Auvinet & Pérez, 2016). Esta técnica consiste en construir el cuerpo del terraplén de las pistas por capas constituidas por fracciones uniformes de un material de tipo *tezontle* obtenidas por cribado del material original.

Se concluye que el uso de *tezontle* con granulometría controlada para la construcción de terraplenes sobre el suelo blando del valle de México presenta un gran interés.

POROSIDAD DE MEDIOS GRANULARES

Desde hace muchos años se ha prestado atención a la porosidad de los materiales granulares y al diseño de mezclas de materiales granulares de alta o baja porosidad (Caquot, 1937; Auvinet & Bouvard, 1987).

La porosidad de los arreglos regulares de partículas esféricas de igual tamaño puede variar entre 0.26 y 0.48. Diversos autores como Caquot (1937); Auvinet (1986); Brouwers (2011) y Sánchez (2017) coinciden en que la porosidad de un arreglo aleatorio de esferas iguales es de aproximadamente 0.44. Sánchez *et al.* (2015a) presentaron evidencias de que la porosidad de estos arreglos aleatorios decrece cuando disminuye la fricción en la superficie de los granos.

En mezclas de esferas de dos tamaños, la porosidad depende de la relación entre los diámetros máximos y mínimos $D_{máx} / D_{mín}$ y de las proporciones en las que se encuentra cada componente (Furnas, 1931; Caquot,

1937; Auvinet, 1986; Dias *et al.*, 2004; Brouwers, 2006 y 2011; Sánchez *et al.*, 2015b; Sánchez, 2017). La porosidad mínima se obtiene cuando la relación de diámetros alcanza un valor tal que las partículas pequeñas rellenen en forma óptima los poros de las partículas grandes. La porosidad máxima se obtiene cuando la mezcla tiende a presentar una granulometría uniforme.

Las mezclas de N componentes pueden presentar porosidades bajas si se rellenan los poros de las partículas grandes con partículas cada vez más pequeñas. Sin embargo, en la práctica se obtienen porosidades mayores que las teóricas debido a los efectos de separación de partículas y de incremento de porosidad en la vecindad de las paredes. Feret (1892) y Auvinet (1986) mostraron que los arreglos aleatorios de tres componentes pueden ser más porosos que los de dos.

Diferentes estudios muestran, por otra parte, que los materiales de granulometría continua tienden a presentar porosidades mayores que los materiales de granulometría discontinua (Caquot, 1937; Auvinet & Bouvard, 1987), contrariamente a lo aceptado en la práctica común que consiste en buscar minimizar la porosidad con granulometrías continuas (Duriez & Arrambide, 1961).

De lo anterior, se concluye que los materiales más porosos son los de granulometría uniforme.

CARACTERIZACIÓN DEL TEZONTLE

En la cuenca endorreica de México predominan rocas volcánicas y sedimentos lacustres. Las rocas volcánicas se encuentran en las sierras de la periferia de la cuenca como secuencias alternadas de derrames de lavas, material piroclástico y cenizas. Los sedimentos lacustres se encuentran distribuidos principalmente en la parte central de la cuenca (Mooser, 1963; Marsal & Mazari, 1959).

Este ambiente geológico conduce a una condición peculiar para el desarrollo de la Ciudad de México desde el punto de vista geotécnico. Por una parte, los suelos blandos de origen lacustre demandan construcciones livianas y, por otra, la escoria producida por los volcanes cercanos es precisamente un material ligero que puede ser útil en la construcción. El *tezontle* (del idioma náhuatl, *tetl*: piedra y *tzontli*: cabellera) ha sido por tanto, ampliamente usado en México desde la época prehispánica. Las escorias volcánicas también han sido consideradas como útiles en otras partes del mundo (Hossain, 2004).

GRANULOMETRÍA

El *tezontle* disponible en los bancos de préstamo de la Ciudad de México, puede presentar granulometrías muy variadas, desde bien graduadas con coeficiente de uniformidad $Cu=23$ (T1 en la Figura 1) hasta mal graduadas con $Cu=2$ (T2 en la Figura 1). El material T1-F3 de la Figura 1 es una fracción granulométrica del *tezontle* bien graduado, de interés en el siguiente apartado de este trabajo.

En algunos casos, se ha observado (González, 2016), que la granulometría del *tezontle*, sin tratamiento alguno en el banco, cumple con las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para materiales de construcción de sub-base de carreteras (SCT, 2011). Este es el caso del *tezontle* bien graduado T1 de la Figura 1.

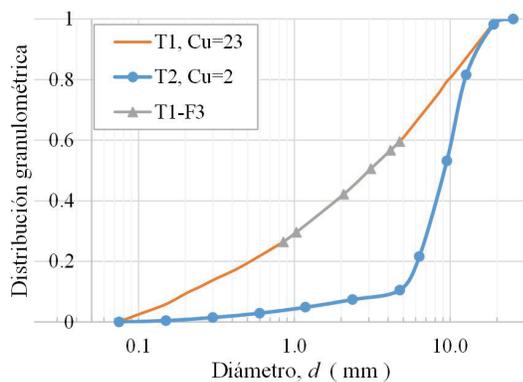


Figura 1. Granulometría de *tezontles* de la Ciudad de México (Instituto de Ingeniería, 2016)

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

La escoria volcánica es un material piroclástico de composición basáltica o andesítica. Se forma cuando el magma que contiene abundantes gases disueltos, fluye desde el interior de un volcán. A medida que la roca fundida emerge de la tierra, la presión se reduce y el gas disuelto trata de escapar en forma de burbujas. Si la roca se solidifica antes de que el gas escape, las burbujas quedan como pequeñas cavidades llamadas vesículas (Kurniawan *et al.*, 2009).

Las vesículas confieren a los granos de escoria una densidad de sólidos, s_s , relativamente baja. Estas vesículas están presentes desde la escala de los minerales hasta la macro escala (Jackson *et al.*, 2005; Agustín, 2009). En análisis petrográficos (a la escala de los minerales constitutivos) se ha observado que las vesículas representan hasta 36 % del volumen total (Agustín, 2009).

Para evaluar la densidad de los granos de escoria, McGetchin *et al.* (1974) colectaron 94 bombas de tamaño

comprendido entre 0.1 y 0.3 m producidas por la erupción del Monte Etna, Italia. Cada fragmento se sumergió en parafina para sellar su superficie. La densidad de cada bomba se obtuvo por inmersión en agua, corrigiendo por volumen y peso de la parafina en cada caso. El intervalo de valores obtenidos fue [1.2, 2.8] como se observa en la Figura 2. Un 50 % de los fragmentos presentaron densidades comprendidas en el intervalo [1.35, 1.92]. La mediana de la densidad de las bombas resultó de 1.53.

Hossain (2004) reporta una densidad de 1.15 para agregados de escoria triturados. Sin embargo, no proporciona detalles del número de mediciones ni de la dispersión de los resultados.

Por su parte, González (2016) obtuvo valores de la densidad de sólidos de 2.58 a 2.92, machacando las partículas de *tezontle* y en consecuencia eliminando la presencia de aire.

Otras pruebas de laboratorio realizadas por Instituto de Ingeniería, UNAM (2014) con partículas de *tezontle* no impermeabilizadas dieron una densidad media de 1.88.

Las diferencias tan considerables entre las densidades obtenidas por los distintos autores se deben a la consideración o no de las vesículas en los granos de escoria.

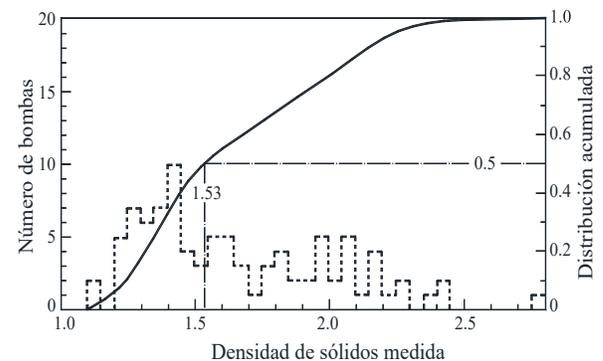


Figura 2. Densidad de bombas del cráter noreste del monte Etna (adaptado de McGetchin *et al.*, 1974)

Las partículas de escoria se caracterizan por la irregularidad y la aspereza de su superficie. Cambou (1974) realizó un estudio sobre el coeficiente de fricción en superficies de distintos tipos de rocas. Se observó que el coeficiente de fricción varía con el tipo de roca, la irregularidad de la superficie, la fuerza normal, la presencia de agua y la velocidad de deslizamiento. Las pruebas con basalto mostraron que para superficies brutas y con distintas cargas normales, el coeficiente de fricción varía entre 0.6 y 0.8. Tomando en cuenta que los granos de escoria tienen la misma composición mineral que el basalto, estos resultados sugieren que se puede adoptar

como representativo el valor medio del coeficiente de fricción $\mu_f = 0.7$.

Para simular muestras granulares de este material con el Método de Elementos Discretos (Programa PFC v5, Itasca, 2015) se considera que el modelo de contacto lineal con resistencia al giro (Iwashita y Oda, 1998; Zhou *et al.*, 2002; Ai *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2015) es el adecuado. En este modelo, los parámetros más relevantes de los granos son el coeficiente de fricción, μ_f , que se asocia a la aspereza de la superficie, y el coeficiente de resistencia al giro, μ_r , que se relaciona con la angulosidad de los granos.

Se ha observado que los volcanes más comunes en la tierra son conos de escoria. Porter (1972) sugiere que la forma del cono refleja, entre otras características, el ángulo de reposo de las partículas de la escoria. Por lo general, este ángulo varía de 30° a 40° (McGetchin *et al.*, 1974). A partir de algunas fotografías, se observa que los montículos de tezontle formados en bancos de préstamo de la Ciudad de México, presentan un ángulo de reposo medio de 36°.

Tomando en cuenta lo anterior, se realiza un análisis de sensibilidad colocando una muestra granular con una granulometría relativamente uniforme dentro de un recipiente cilíndrico. Se proponen pares de valores μ_f , μ_r y, el recipiente se desplaza hacia arriba para que el material granular forme un montículo (de acuerdo con la metodología sugerida por Itasca (2015)). En cada caso se calcula el ángulo de reposo del montículo resultante. La Figura 3 presenta el montículo obtenido por simulación correspondiente a $\mu_f = 0.7$ y $\mu_r = 0.5$.

En la Figura 4 se observa que el ángulo de reposo de los montículos simulados es aproximadamente constante para $0.5 < \mu_f < 1.0$ y para $0.5 < \mu_r < 0.9$. Con $\mu_f = 0.1$ no se forma montículo. Los resultados indican que el coeficiente de fricción tiene mayor influencia que el

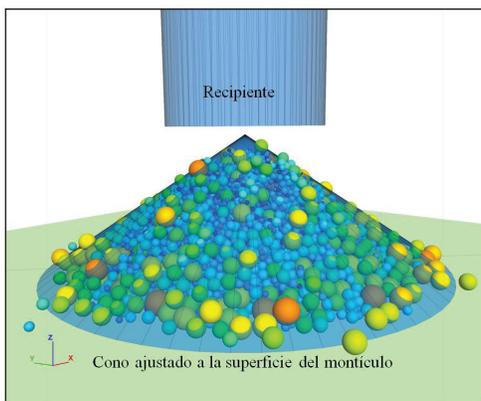


Figura 3. Simulación de la formación de un montículo de escoria volcánica considerando partículas esféricas friccionadas y con resistencia al giro

coeficiente de resistencia al giro sobre el ángulo de reposo del montículo.

Para afinar los resultados se simula la formación de otros montículos con la granulometría T1-F3 (Figura 1), con $\mu_f = 0.7$ y con diferentes valores de μ_r . De acuerdo con las observaciones de McGetchin *et al.* (1974) y en forma conservadora, se adopta un valor de $\mu_r = 0.5$ (Figura 4) como representativo de los granos de escoria.

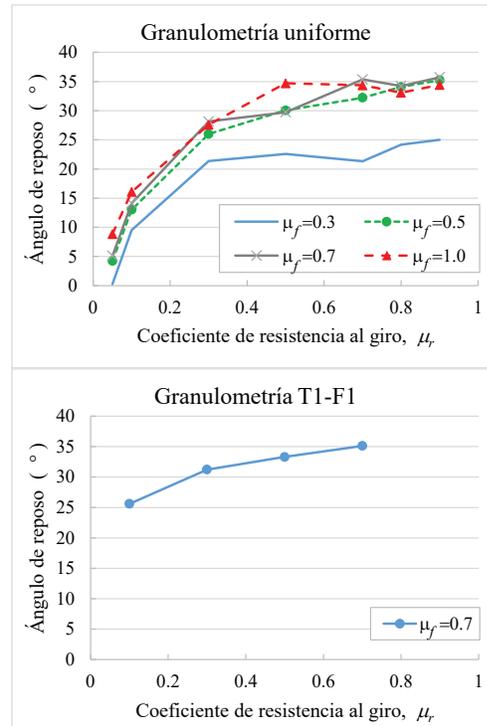


Figura 4. Calibración de las propiedades físicas del tezontle, coeficiente de fricción μ_f y coeficiente de resistencia al giro μ_r

POROSIDAD DE MUESTRAS DE TEZONTLE

Como se señaló en el apartado de porosidad de medios granulares, este parámetro es mayor para materiales de granulometría uniforme. Por tanto, se propone separar los materiales típicos de la Figura 1 en fracciones granulométricas relativamente uniformes como se muestra en la Figura 5.

Por facilidad práctica, los límites de las fracciones granulométricas corresponden a aberturas de mallas estándar. Se busca también distribuir las fracciones granulométricas en proporciones de peso, p , aproximadamente iguales.

Para cada fracción granulométrica se simula una muestra granular con 30,000 partículas esféricas, recurriendo al Método de Elementos Discretos, considerando las características físicas de los granos obtenidas en el inciso anterior.

La formación de la muestra granular consiste en escoger los diámetros de las partículas de acuerdo con la granulometría conocida (Auvinet, 1986), las partículas se generan en posiciones aleatorias dentro de un espacio en forma de paralelepípedo, se asignan los parámetros de la simulación y se dejan caer las partículas por gravedad hasta alcanzar el equilibrio. La Figura 6 ejemplifica este procedimiento.

La Figura 7 presenta la granulometría obtenida simulando cada fracción granulométrica por separado. Los puntos muestran la granulometría obtenida en laboratorio (Instituto de Ingeniería, 2016). Se observa que las simulaciones numéricas reproducen satisfactoria-

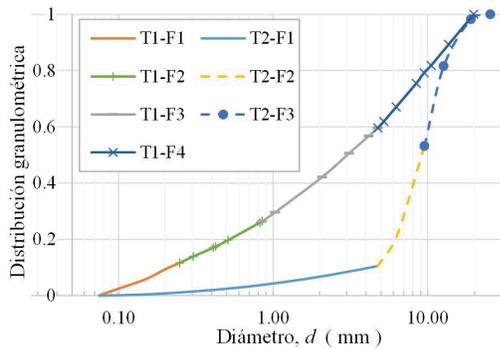


Figura 5. Separación de los tezontles en fracciones granulométricas

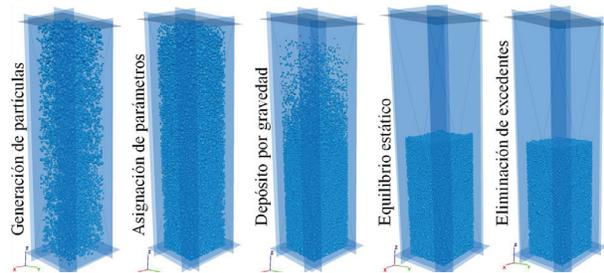


Figura 6. Proceso de simulación de muestras granulares de tezontle

mente la granulometría obtenida en laboratorio.

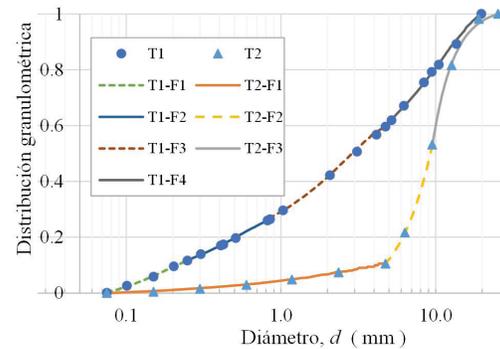


Figura 7. Comparación de las granulometrías obtenidas por simulación y en laboratorio

También se simularon simultáneamente dos o tres fracciones granulométricas con la finalidad de mostrar el efecto de la granulometría sobre la porosidad. No es posible simular la granulometría completa porque se requeriría un número excesivo de partículas, del orden de 10^{11} granos.

Para evaluar la porosidad de cada muestra simulada se recurre a la técnica de Monte Carlo. Se generan puntos al azar en el espacio y se cuenta el número de puntos que caen en los poros. La porosidad se calcula como la relación entre el número de puntos en los poros y el número total de puntos utilizados en la estimación. La evaluación se realiza en un volumen suficientemente grande respecto al tamaño de las partículas para evitar efectos de escala (Auvinet 1986, Auvinet y Bouvard, 1988). Se utilizan 10^6 puntos para que el error asociado al método de estimación sea suficientemente bajo (Sánchez *et al.*, 2015a), en este caso del orden de 0.05 %. El volumen de análisis se mantiene alejado de las fronteras para evitar un sesgo en la porosidad por efecto de pared (Auvinet, 1986).

La Tabla 1 presenta la porosidad medida en las muestras granulares de acuerdo con el párrafo anterior. La porosidad de las fracciones granulométricas uniformes es claramente mayor que la de las fracciones granulométricas mejor graduadas como F3 + F4, F2 + F3 + F4 y T2 - F1.

Tabla 1. Características de las muestras granulares simuladas

Muestra	d (mm)	p	Cu	n (%)	Muestra	d (mm)	p	Cu	n (%)
T1-F1	[0.075,0.25]	0.12	1.9	38.5	T2-F1	[0.025, 4.75]	0.10	8.5	25.9
T1-F2	[0.25, 0.85]	0.15	1.9	38.3	T2-F2	[4.75, 9.53]	0.43	1.4	40.7
T1-F3	[0.85, 4.75]	0.33	2.4	35.9	T2-F3	[9.53, 25.4]	0.47	1.3	39.8
T1-F4	[4.75, 19.8]	0.40	2.0	37.6					
F3+F4	[0.85, 19.8]	0.73	5.6	25.0					
F2+F3+F4	[0.25, 19.8]	0.88	9.5	22.9					

p = proporción, en peso, que representa una fracción granulométrica

Es de esperarse que la porosidad de los tezontles T1 y T2 considerando toda la granulometría sea inferior a 23 %. Se confirma así, que el peso volumétrico de un material granular con su granulometría completa es mayor que la de sus fracciones granulométricas.

PESO VOLUMÉTRICO DE MUESTRAS DE TEZONTLE

Tomando en cuenta la densidad de los granos de tezontle incluyendo las vesículas de aire (McGetchin *et al.*, 1974) y la porosidad de las muestras granulares simuladas es posible obtener el peso volumétrico de distintas muestras de tezontle.

Para las muestras de tezontle simuladas, la Tabla 2 presenta el peso volumétrico seco, γ_d , que se calcula con la expresión 1.

$$\gamma_d = (1 - n) s_s \gamma_w \tag{1}$$

Donde:

- n = porosidad del material granular
- s_s = densidad de sólidos considerando la presencia de vesículas en las partículas
- γ_w = peso volumétrico del agua

En la Tabla 2 se observa que el peso volumétrico del material crece cuando aumenta el coeficiente de uniformidad granulométrico. La separación en fracciones granulométricas permite reducir el peso volumétrico aproximadamente en un 23 %. En efecto, se pone en evidencia que controlando la granulometría se obtienen porosidades que varían de 0.22 a 0.40, al mismo tiempo que el peso volumétrico seco pasa de 12.2 kN/m³ a 9.4 kN/m³, respectivamente.

Tomando en cuenta que las simulaciones se realizan con partículas esféricas, las porosidades así obtenidas pueden representar un límite inferior de los valores reales. Como continuación de este trabajo, se estudia el efecto de la geometría de los granos sobre la porosidad del medio granular.

Tabla 2. Peso volumétrico de muestras de tezontle

Muestra granular	Cu	γ_d (kN/m ³)	Muestra granular	Cu	γ_d (kN/m ³)
T1-F1	1.9	9.4	T2-F1	8.5	11.3
T1-F2	1.9	9.4	T2-F2	1.4	9.1
T1-F3	2.4	9.8	T2-F3	1.3	9.2
T1-F4	2.0	9.5			
F3+F4	5.6	11.5			
F2+F3+F4	9.5	11.8			

González (2016) obtuvo pesos volumétricos de 9 a 12 kN/m³ en muestras de tezontle en estado suelto con granulometría bien graduada. El segundo valor coincide satisfactoriamente con el que se obtiene en la muestra F2+F3+F4. En la práctica es posible obtener valores de peso volumétrico menores debido a la forma irregular de los granos de tezontle y porque en las simulaciones se adoptaron valores conservadores del coeficiente de fricción y del coeficiente de resistencia al giro de las partículas.

Para muestras de granos aproximadamente uniformes de escoria volcánica de Djoungo, Camerún, Juimo *et al.* (2016) reportan pesos volumétricos de 5.6 a 8.2 kN/m³ y porosidades de 48 a 54 %. Sin embargo, los autores señalan que cada espécimen de prueba está constituido por solamente 20 granos, por lo que sus resultados son poco representativos.

CONSTRUCCIÓN DE TERRAPLENES LIGEROS

A continuación, se presenta una técnica constructiva de terraplenes ligeros que aprovecha por una parte la porosidad naturalmente alta de los materiales de granulometría uniforme y por otra las propiedades peculiares del tezontle examinadas en los incisos anteriores. Esta técnica fue propuesta para la construcción de pistas de aeropuerto sobre suelos blandos e implementada en terraplenes de prueba (Auvinet, 2016).

Un terraplén típico está constituido por el cuerpo principal del terraplén y por los materiales superficiales que constituyen el pavimento (Figura 8). Los materiales del pavimento (base y carpeta asfáltica) tienen requisitos estrictos de resistencia y deformabilidad que no permiten el empleo de materiales de alta porosidad. Por lo contrario, el cuerpo del terraplén puede construirse con materiales ligeros como el tezontle para evitar asentamientos excesivos.

Considerando la granulometría natural de tezontles como los estudiados en este trabajo, es posible construir un terraplén ligero siguiendo los pasos y recomendaciones siguientes:

- Por cribado, se divide el material disponible en tres o cuatro fracciones con granulometría lo más uni-



Figura 8. Terraplén sobre suelos blandos. Condición inicial y deformada

forme posible ($C_u < 2$). Se sugiere separar las fracciones granulométricas de acuerdo con las mallas estándar. Es preferible que las fracciones granulométricas representen partes iguales en proporciones de peso. Eventualmente se puede desechar la fracción de partículas más pequeñas si esta representa una baja proporción del total de peso.

- Se coloca a volteo el material de cada fracción granulométrica en una capa del terraplén y se acomoda con equipo ligero. Considerando que la porosidad de las distintas fracciones granulométricas por separado es aproximadamente la misma, las capas del terraplén resultarán de un espesor proporcional a la proporción en peso que representa la fracción granulométrica. Para un terraplén de 1m de espesor, una capa resultará de 25 cm si la fracción granulométrica que la constituye representa 25 % en peso del total de la granulometría.
- Se coloca el material en orden de tamaño decreciente, con la fracción granulométrica de las partículas más grandes en la parte inferior.
- Se separan las capas del terraplén con un geotextil para evitar la mezcla de partículas de diferentes capas que afecte la porosidad. La presencia del geotextil contribuye a aumentar aún más la porosidad por efecto de frontera (Auvinet, 1986).
- Se colocan los materiales del pavimento (base y sub-base) en forma tradicional.

La Figura 9 muestra la configuración de las capas de tezontle adoptada para un terraplén de prueba con drenes de arena para aceleración del proceso de consolidación (Auvinet, 2016).

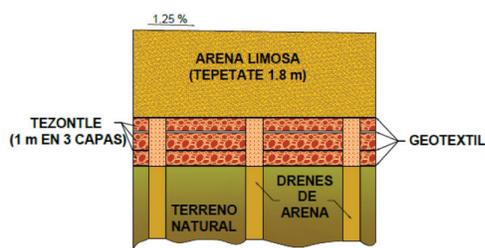


Figura 9. Colocación de tezontle por capas de fracciones granulométricas diferentes en un terraplén de prueba

La Figura 10 presenta simulaciones de dos calas representativas de terraplenes ligeros construidos con los tezontles analizados en esta investigación. Se usa un factor de escala para aumentar el tamaño de los granos; lo anterior permite reducir el número de partículas y disminuir el tiempo de cómputo sin alterar la granulometría.

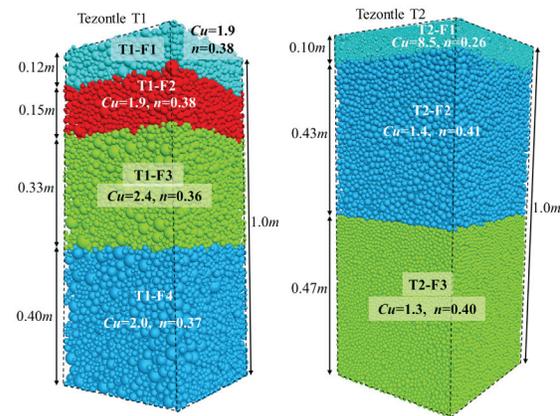


Figura 10. Simulación de calas en terraplenes ligeros construidos por capas

En las calas simuladas no se incluye el geotextil para separar las capas, por lo que algunas partículas pueden migrar de una capa a otra, principalmente en el tezontle T2. Si se colocaran los tezontles sin separarlos en fracciones granulométricas y con la misma cantidad de material, la altura de 1m del terraplén se reduciría a 0.78 m aproximadamente. Ya se mencionó que, en la práctica, con partículas más ligeras y no esféricas, pueden esperarse diferencias aún mayores.

La construcción de terraplenes ligeros siguiendo las directrices de este trabajo tiene por tanto como ventaja, además de reducir los asentamientos esperados, la de disminuir el peso de material por acarrear para que el terraplén alcance determinada elevación.

Conviene finalmente recordar que, en presencia de un nivel freático poco profundo, el cálculo de los esfuerzos efectivos actuantes en el suelo y del asentamiento del terraplén correspondiente debe tomar en cuenta el alivio adicional en el peso de los materiales por efecto de la sumersión (Auvinet, 1979 y 2016). En efecto, a consecuencia de los asentamientos, una parte del suelo natural superficial y eventualmente del terraplén puede pasar abajo del nivel freático (Figura 8). El peso volumétrico sumergido de un suelo es igual a:

$$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w \tag{2}$$

Donde:

γ_{sat} = peso volumétrico saturado
 γ_w = peso volumétrico del agua

CONCLUSIONES

Los suelos blandos de la Ciudad de México demandan materiales de construcción ligeros. Este trabajo se enfoca en el diseño de terraplenes livianos que pueden ser utilizados con diferentes objetivos. Los materiales granulares de granulometría uniforme presentan un menor peso volumétrico que los materiales bien graduados.

Para una mayor reducción del peso volumétrico es posible recurrir a escorias volcánicas (*tezontle*). El *tezontle* es un material de peso volumétrico generalmente bajo debido a la presencia de vesículas en el interior de las partículas. Además, la aspereza de la superficie de las partículas dificulta el movimiento relativo entre granos, lo que contribuye a mantener una porosidad alta.

Se presentan en este trabajo, simulaciones de la estructura de *tezontles* típicos recurriendo al Método de Elementos Discretos. Para obtener un valor representativo de la densidad de los granos de *tezontle* se recurrió a resultados de experimentos físicos reportados en la literatura y se adoptó el estudio mejor planteado estadísticamente. Los valores de otros parámetros se obtuvieron por medio de un análisis paramétrico, comparando el ángulo de reposo obtenido de simulaciones numéricas con el ángulo de reposo observado en conos volcánicos y en montículos de bancos de materiales.

En las simulaciones numéricas realizadas se consideró como representativo un modelo de contacto lineal con resistencia al giro. En este, el coeficiente de fricción, μ_f , se asocia a la aspereza de la superficie, y el coeficiente de resistencia al giro, μ_r , se relaciona con la angulosidad de los granos.

El análisis de la variación de la porosidad se realizó con dos *tezontles*, uno bien graduado y otro mal graduado. Se observó que la porosidad puede aumentar aproximadamente al doble cuando el material se separa en fracciones granulométricas.

En los *tezontles* analizados, dicha separación permite obtener materiales de granulometría aproximadamente uniforme, con un peso volumétrico del orden de 23 % más liviano que el del material original. El mismo principio se puede aplicar a cualquier material granular. Esta afirmación se sustenta en diversas investigaciones, teóricas y experimentales, sobre mezclas óptimas (de porosidad mínima).

Los pesos volumétricos obtenidos a partir de las simulaciones coinciden con resultados experimentales. Algunos autores reportan pesos volumétricos aún menores y aunque no se da información suficiente para calibrar las simulaciones aquí realizadas, es posible que dichos pesos se logren si la densidad de los granos de

tezontle es menor, o si la forma angulosa de las partículas favorece una mayor porosidad.

La presente investigación permite dar recomendaciones prácticas para la construcción de terraplenes ligeros colocando cada fracción granulométrica en una subcapa. Se recomienda agregar un geotextil entre las subcapas para evitar la migración de partículas y aumentar la porosidad aún más por efecto de frontera.

Se considera necesario realizar experimentación física para complementar los resultados de este trabajo.

REFERENCIAS

- Agustín, J. (2009). *Geología y petrogénesis de los volcanes monogenéticos pelagatos, cerro del agua y dos cerros en la sierra Chichinautzín, al sur de la Ciudad de México*. (Tesis de Maestría en ciencias (Vulcanología)). Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Ai J., Chen, J., Rotter, J. & Ooi, J. (2011). Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations. *Powder Technology*, 206, 269-282.
- Auvinet, G. (1979). Precarga en arcillas del Valle de México. Memoria, Simposio sobre mejoramiento masivo de suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp. 100-102, México.
- Auvinet, G. (1986). *Estructura de los medios granulares*. (Tesis doctoral). División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Auvinet, G. & Bouvard, D. (1987). Low porosity granular soils mixtures. VIIIth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3, 251-261, Cartagena, Colombia.
- Auvinet, G. & Bouvard, D. (1988). Geometric scale effect in granular media. Proc. of Powders and Grains, International Conference on Micromechanics of Granular Media, 29-34, Gourves et al., Eds. Clermont-Ferrand, France.
- Auvinet, G. & Pérez A. M. (2016). Terraplenes y bordos sobre suelos blandos. Memoria, XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, Mérida, México
- Brouwers, H. (2006). Particle-size and packing fraction of geometric random packings. *Physical Review*, E 74, 031309, 1-14.
- Brouwers, H. (2011). Packing fraction of geometric random packings of discretely sized particles. *Physical Review*, E 84, 042301, 1-3.
- Cambou, B. (1974). *Etude du frottement entre matériaux rocheux*. Coopération technique Franco-Mexicaine: Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Caquot, A. (1937). Rôle des matériaux inertes dans le béton. Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France, Fascicule 4, Juillet-Août, France.
- Dias, R., Teixeira, J., Mota, M. & Yelshin, A. (2004). Particulate binary mixtures: dependence of packing porosity on particle size ratio. *American Chemical Society, Ind. Eng. Chem., Res.* 43, 7912-7919. <https://doi.org/10.1021/ie040048b>

- Duriez, M. & Arrambide, J. (1961). *Nouveau traité de matériaux de construction*. Vol. I, France: Dunod Editeur.
- Feret, R. (1892). *Annales des Ponts et Chaussées*. Paris, France: Juillet.
- Furnas, C. (1931). Grading aggregates. I. Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. *Ind. Eng. Chem.*, 23, USA.
- González, D. (2016). *Caracterización mecánica de escoria volcánica compactada de la Ciudad de México y sus alrededores*. (Tesis de maestría (Geotecnia)). Programa de Maestría y Doctorado en Geotecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Hossain, K. (2004). Properties of volcanic scoria based lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*, 56(2), 111-120. <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1680%2Fmacr.56.2.111.36296>
- Instituto de Ingeniería, UNAM. (2014). *Reporte interno de pruebas del laboratorio de vías terrestres. Densidad relativa de materiales pétreos para mezclas asfálticas*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Instituto de Ingeniería, UNAM. (2016). Nota Técnica No. GEO-44. Investigaciones y estudios especiales relacionados con aspectos geotécnicos del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) en el vaso del Ex lago de Texcoco, zona federal, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Itasca Consulting Goup Inc. (2015). *Particle flow code 5.0, documentation*. Updated Jun, 2019.
- Iwashita, K. & Oda, M. (1998). Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, (124), 285-292. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=2143042>
- Jackson, J.A., Mehl, J. & Neuendorf, K. (2005). *Glossary of Geology*. Alexandria, Virginia: American Geological Institute. ISBN 0-922152-76-4.
- Jiang, M., Shen, Z. & Wang, J. (2015). A novel three-dimensional contact model for granulates incorporating rolling and twisting resistances. *Computers and Geotechnics*, (65), 147-163.
- Juimo, W., Cherradi, T., Abidi, L. & Oliveira, L. (2016). Characterization of natural pozzolan of "Djoungo" (Cameroon) as lightweight aggregate for lightweight concrete. *International Journal of GEOMATE*, 11(27), 2782-2789.
- Kurniawan, A., Kenzie, J. Mc. & Putri, J.A. (2009). General dictionary of geology. *Environmental Geographic Student Association*, Indonesia. <https://doi.org/10.1029/JB079i023p03257>
- Marsal, R.J. & Mazari, M. (1959). *The subsoil of Mexico City*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- McGetchin, T., Settle, M. & Chouet, B. (1974). Cinder cone growth modeled after northeast craters, Mount Etna, Sicily. *Journal of Geophysical research*, 79, (23), 3257-3272. <https://doi.org/10.1029/JB079i023p03257>
- Mooser, F. (1963). Historia tectónica de la Cuenca de México. *Boletín de la Asociación de Geólogos Petroleros*, Nov-Dic, 1963.
- Porter S. (1972). Distribution, morphology and size frequency of cinder cones on Mauna Kea volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, 83, 3607-3612
- Sánchez, J., Auvinet, G. & Cambou, B. (2015a). Fabric of monosized granular media. *Geomechanics form Micro to Macro*. Soga *et al.* (eds): 1, 73-78, ©Taylor & Francis Group, London, U.K.
- Sánchez, J., Auvinet, G. & Cambou, B. (2015b). Coordination number and geometric anisotropy in binary sphere mixtures. *Geomechanics form Micro to Macro*. Soga *et al.* (eds.): 1, 225-230, ©Taylor & Francis Group, London, U.K.
- Sánchez, J. (2017). *Estudio de los medios granulares por el método de elementos discretos*. (Tesis doctoral). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/12372>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2011). Características de los materiales para pavimentos: Materiales para Sub base y Base, N-CMT.4-02-001/11, México.
- Zhou, Y., Xu, B. & Zulli, P. (2002). An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres. *Powder Technology*, 25, 45-54.