

Segregación inherente en medios granulares

Inherent Segregation in Granular Media

Sánchez-Guzmán J.

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
E-mail: chucho_sguzman@yahoo.com.mx

Auvinet-Guichard G.

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
E-mail: gauvinetg@iingen.unam.mx

Información del artículo: recibido: agosto de 2009, aceptado: enero de 2011

Resumen

Se presenta un estudio de la segregación inherente existente en medios granulares por el efecto de la dimensión relativa de los distintos granos. Se utiliza un modelo numérico para la simulación geométrica de estructuras granulares. Tanto para la simulación como para el estudio de las estructuras granulares se hace un amplio uso de la teoría de probabilidad. Las partículas se idealizan con círculos (modelo 2D) y esferas (modelo 3D). Se simulan materiales de granulometría estrictamente uniforme, bimodal (dos tamaños) y continua. Se proponen dos variables para medir la segregación que permiten apreciar los efectos de las variables granulométricas. En estructuras uniformes se observa la presencia de una estructuración espontánea. En las bimodales y continuas, la segregación depende principalmente de la relación entre los diámetros máximo y mínimo de las partículas. Se señalan algunas implicaciones prácticas que la segregación puede tener en los problemas de la geotecnia y otras disciplinas.

Abstract

A study of the inherent segregation within granular media due to the relative size of the different particles is presented. A numerical model is used to simulate granular structures. For both simulation and granular structures evaluations, probability theory is widely used. Particles are idealized by disks (2D model) and spheres (3D model). Strictly uniform grain size materials, bimodal (two particle sizes) and continuous are simulated. Two variables representing segregation and allowing appreciating the grain-size parameters effects are considered. In uniform materials, the presence of spontaneous structuring is observed. In bimodal and continuous materials, inherent segregation mainly depends on the ratio between maximum and minimum diameters of particle. Some practical implications of inherent segregation in geotechnical problems and other disciplines are remarked.

Descriptores

- segregación inherente
- simulación
- probabilidad
- estructuración espontánea
- relación de diámetros
- concentración espacial

Keywords

- inherent segregation
- simulation
- probability
- spontaneous structuring
- diameter ratio
- spatial concentration

Introducción

Los materiales granulares se encuentran presentes en un sin número de procesos productivos, fenómenos de interés científico o técnico y en particular, en la geotecnia. La segregación es la separación de los constituyentes de la mezcla granular en grupos de partículas con características similares. El tamaño, forma, densidad y rugosidad de la superficie de las partículas, son considerados como las principales propiedades del material que influyen en la segregación. Por otra parte, el manejo del material también tiene una influencia importante sobre el fenómeno.

En este trabajo se estudia la segregación inherente que se presenta en los medios granulares por el efecto de las dimensiones relativas de las partículas. Las estructuras granulares se simulan con modelos numéricos analógicos (Auvinet, 1972) bidimensional (2D) y tridimensional (3D). Se consideran partículas de forma circular o esférica. Se estudian granulometrías estrictamente uniformes, bimodales y continuas.

La segregación causada por la granulometría se describe mediante parámetros estadísticos y probabilistas aplicados a la concentración espacial de partículas y a la distancia entre centros de partículas similares.

Propiedades geométricas de los materiales granulares

Tamaño de partícula

Debido a la irregularidad natural de la geometría de los granos, no es sencillo asignarles un tamaño único. Algunos procedimientos para asignar un tamaño a las partículas son: análisis por mallas (asignar la dimensión de la malla más grande en la que queda retenida la partícula), esfera equivalente (se toma el diámetro de la esfera que iguala el volumen o superficie de la partícula), la media de las dimensiones y el diámetro efectivo en un proceso de sedimentación de acuerdo con la ley de Stokes.

Distribución y densidad de probabilidad granulométrica

Después de determinar el tamaño de las partículas de una muestra representativa del material, y aceptando que el peso específico de los sólidos es constante, se define a $F_{3V}(d) \in [0,1]$ como la proporción (en volumen) de partículas con diámetro menor o igual que d (Auvinet, 1986). En términos probabilísticos, esta función se interpreta como la probabilidad de que un punto tomado al

azar dentro de los granos, pertenezca a una partícula de diámetro menor o igual que d . A la derivada respecto al diámetro $f_{3V}(d)$, se le conoce como densidad de probabilidad. En mecánica de suelos, la forma de la curva granulométrica representativa de $F_{3V}(d)$ se describe comúnmente mediante los coeficientes de curvatura (C_C) y uniformidad (C_U).

Porosidad

Se llama porosidad (n) a la relación entre el volumen de vacíos (V_V) y el volumen total (V_T) del material. A diferencia de otros parámetros que se usan para representar las proporciones de vacíos y sólidos en un medio particulado, los valores de la porosidad pueden variar en $[0, 1]$, permitiendo un manejo probabilista más cómodo. Además, conviene tomar en cuenta que en un medio homogéneo e isótropo, la porosidad tridimensional (n) es igual a la porosidad obtenida de un corte plano (n_A) o sondeo recto (n_L) (principio de Delesse).

Distribución espacial de partículas

La distribución espacial de partículas puede describirse introduciendo una función aleatoria $N_V(V)$ igual al número de partículas contenidas en un volumen cualquiera V . El número esperado de partículas por unidad de volumen (λ_V) en medios homogéneos de partículas aproximadamente esféricas es:

$$\lambda_V = \frac{1-n}{E_{3D} \left\{ \frac{\pi}{6} D^3 \right\}} \quad (1)$$

donde

$E_{3D}\{\}$ es la esperanza (en frecuencias de número de partículas) de la variable indicada,

D es el diámetro de partícula.

También es posible introducir parámetros que representan el número esperado de partículas por unidad de área (λ_A) o de longitud (λ_L) en cortes planos y sondeos rectos respectivamente (Auvinet, 1986).

$$\lambda_A = \lambda_V E_{3D}\{D\} \quad (2)$$

$$\lambda_L = \lambda_V E_{3D} \left\{ \frac{\pi}{4} D^2 \right\} \quad (3)$$

Estructura geométrica

El estudio de la estructura de los medios granulares puede ser una tarea muy complicada. Es por tanto conveniente recurrir a arreglos formados por partículas idealizadas, por ejemplo círculos y esferas. Los arreglos elementales se forman con discos de igual diámetro donde los centros se disponen en mallas cuadradas y triangulares, con porosidad de 21.5 y 9.3%, respectivamente. Las esferas del mismo tamaño pueden organizarse de cinco formas básicas: arreglo cúbico simple, cúbico tetraédrico, tetragonal esfenoidal, piramidal y tetraédrico. En el mismo orden, los arreglos son cada vez menos porosos (de 47.6 a 25.9%) y el número de coordinación (número de esferas con las que una esfera tiene contacto) es cada vez mayor.

Otra alternativa consiste en suponer que los centros de gravedad de las partículas se distribuyen al azar en el espacio de acuerdo a un proceso de Poisson. En este caso, la distancia T que separa los centros de dos partículas tiene una densidad de probabilidad exponencial (ecuaciones 4 y 5 en medios 2D y 3D, respectivamente) (Auvinet, 1986).

$$f_{2T}(t) = 2\pi\lambda_A t \exp(-\lambda_A \pi t^2) \quad (4)$$

$$f_{3T}(t) = 4\pi\lambda_V t^2 \exp\left(-\lambda_V \frac{4}{3}\pi t^3\right) \quad (5)$$

Esta hipótesis (Poissonian) no se cumple estrictamente debido a que la presencia del centro de una partícula condiciona a que otro no pueda ubicarse a una distancia menor o igual al radio de la primera. La densidad de probabilidad condicional que toma en cuenta esta condición es:

$$f_T(t | t \geq D_{min}) = \frac{f_T(t)}{1 - F_T(D_{min})}; \text{ para } t \geq D_{min} \quad (6)$$

Segregación

Importancia en geotecnia

Cuando las partículas similares de un medio granular tienden a agruparse, se genera una heterogeneidad en propiedades como la porosidad, peso volumétrico, permeabilidad, resistencia y deformabilidad que son generalmente desfavorables para las estructuras constituidas por estos materiales.

Para reducir la segregación y los problemas que ocasiona, se han considerado algunas recomendaciones

prácticas para la selección y manejo de materiales. Así, en el diseño de filtros se prefieren materiales de granulometría continua con un rango estrecho de tamaños de partículas y con $C_U < 6$. Sherard *et al.* (1984a y b), señalan que el tamaño de los agregados de partículas pequeñas está gobernado por la presencia de las partículas grandes (el D_{90}), por lo que el tamaño máximo admisible es 60 mm.

Respecto al manejo del material se recomienda: manipular por separado materiales de granulometría aproximadamente uniforme, evitar formar pilas altas, pues facilitan el rodamiento de partículas grandes, llenar los camiones de transporte con varias descargas, no descargar material pendiente abajo, entre otras.

Mecanismos de segregación

Se denomina mecanismo de segregación al proceso regular que produce la agrupación de partículas similares. El mecanismo de condensación tiene su origen en la diferencia de la densidad de las partículas: las partículas más pesadas tienden a ubicarse en la parte baja del medio y las livianas viajan a mayores elevaciones (Schröter *et al.*, 2006). El mecanismo de convección se presenta en mezclas de partículas de diferentes tamaños, que al someterse a ciertas condiciones de vibración (en un contenedor), presentan un movimiento cíclico; las partículas grandes transportadas a la superficie del medio no pueden entrar en los poros del material, acumulándose en dicha región (Zuriguél, 2003). La segregación por percolación se origina por la entrada de las partículas pequeñas en los espacios vacíos, con ligeras perturbaciones el mecanismo se reactiva, hasta que la estructura granular tiende a ser localmente de partículas iguales.

La combinación de las propiedades del material con los procesos mecánicos presentes en la naturaleza da como resultado mecanismos de segregación más complejos.

Modelos de estudio

Son las representaciones físicas o virtuales de las secuencias de formación o manejo de los materiales granulares. Los modelos utilizados son pocos y de alcances limitados. En general, la segregación se mide por la concentración de partículas en el espacio y por inspección visual del medio.

Ottino y Khakhar, 2000, reportan el estudio de la segregación y mezclado de partículas contenidas en un cilindro rotatorio. La segregación aparece cuando el cilindro parcialmente lleno gira a baja velocidad y se pro-

ducen deslizamientos intermitentes. Durante el deslizamiento, las partículas grandes (o las ligeras) ruedan sobre las pequeñas (o las pesadas) quedando separadas cuando vuelven a entrar en reposo. Al crecer la velocidad de rotación, los componentes del material tienden a mezclarse a menos que se alcance la centrifugación, condición en la cual las partículas no cambian de posición dentro del recipiente.

Los modelos de transporte de partículas en planos inclinados son de gran interés en la industria. Savage y Lun (1988), observaron el mecanismo de segregación por percolación en mezclas de partículas de diferentes tamaños que se mueven por acción de la gravedad. Sin embargo, en regímenes de operación elevados las fuerzas gravitatorias pierden presencia, las partículas grandes descienden en el medio (Khakhar *et al.*, 1999) y el mecanismo de segregación se invierte.

Otros modelos representan la formación de montículos y llenado de recipientes para estudiar principalmente la segregación por tamaño (Carson *et al.*, 1986 y Boutreux *et al.*, 1999). Al vaciar el material en un punto fijo, las partículas pequeñas son atrapadas con mayor facilidad en la superficie donde caen; en cambio, las grandes tienden a alejarse del punto de vaciado.

De gran relevancia son los modelos de vibración, por ejemplo, Navakas, 2006; Schröter *et al.*, 2006 y Zuriguel, 2003. Se caracterizan por involucrar las interacciones mecánicas entre partículas, y han permitido estudiar los tres mecanismos de segregación mencionados con anterioridad en mezclas granulares de dos componentes.

Técnicas de simulación

Los modelos virtuales constituyen una extensión de los modelos físicos y se apoyan en dos técnicas de simulación básicas: geométricas y de dinámica de partículas. Las simulaciones geométricas se caracterizan porque las interacciones entre partículas son únicamente de tipo geométrico, como las simulaciones de Monte Carlo (Khakhar, *et al.*, 1999) y simulaciones estáticas (Auvinet,

1972). En las simulaciones dinámicas se consideran las propiedades e interacciones mecánicas entre partículas (Método de Elementos Discretos propuesto por Cundall en 1971).

Modelo de estudio utilizado

En este trabajo se implementó el modelo de simulación (2D y 3D) de Auvinet (1972) con algunos complementos en el lenguaje de programación de Matlab. Se trata de la simulación estática de la formación de medios granulares y del estudio de su estructura granular. La formación de las estructuras granulares consiste en:

- Definir un recipiente aproximadamente cuadrado, con tres grandes círculos, o cúbico, con cinco grandes esferas secantes (figura 1). Esta forma del recipiente simplifica el algoritmo de simulación.
- Para colocar las partículas una a una, el diámetro se selecciona al azar de una granulometría predefinida. Se consideran granulometrías uniformes (un solo tamaño); bimodales (dos tamaños) con distintas proporciones de partículas pequeñas (p_{2A} en área para el caso 2D y p_{3V} en volumen para el caso 3D) y distintas relaciones entre los diámetros $\alpha = D_{\max}/D_{\min} \in [1,15]$; y continuas con densidad de probabilidad granulométrica lineal (Auvinet, 1986) definidas con α y un coeficiente de distribución granulométrica $\gamma \in \{0, 1, 2\}$ (correspondiendo $\gamma = 1$ a una densidad uniforme, y $\gamma = 0$ y $\gamma = 2$ a una densidad triangular, con máximo en D_{\max} y D_{\min} , respectivamente).
- De una serie de posiciones aleatorias dentro del recipiente se elige la de menor elevación y se buscan los apoyos de la partícula.
- Se revisa que no haya intersección entre partículas o con el recipiente y se verifica el equilibrio estático.
- Se repiten los pasos anteriores hasta llenar el recipiente. Con ayuda de la ecuación (1) se determinó que era necesario un número de 20 000 y 30 000 partículas para las simulaciones 2D y 3D, respectivamente.

El algoritmo de formación adoptado corresponde a un proceso manual de colocación de partículas, sin perturbación ocasionada por vibración u otros factores. Para caracterizar la estructura, se elaboraron programas para medir la granulometría y la porosidad en las estructuras simuladas.

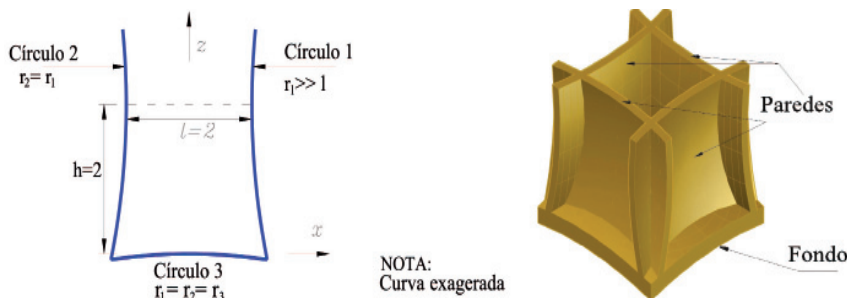


Figura 1. Recipientes de simulación 2D y 3D

La segregación se mide con la concentración de partículas (ecuaciones 2 y 3) en sondeos rectos (modelo 2D) o planos de corte (modelo 3D) verticales y horizontales, y la distancia mínima entre centros de partículas similares.

La granulometría teórica de los materiales se reprodujo satisfactoriamente en todas las simulaciones. La porosidad media de las estructuras fue de 16 y 36% en medios 2D y 3D, respectivamente, con un intervalo de variación de 10% dependiendo de la granulometría. De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), los materiales de granulometría continua simulados alcanzan a representar las arenas naturales más uniformes ($C_u < 4$).

Estudio de la segregación

Granulometría uniforme

En estas estructuras no se puede hablar de segregación debido a que todas las partículas son idénticas; sin embargo, se observó que las primeras partículas colocadas adoptan una configuración regular (estructuración espontánea). En estructuras 2D, los centros de tres discos vecinos forman triángulos equiláteros, a mayor escala se aprecian cuatro grupos triangulares separados por una discontinuidad con mayor porosidad (figura 2a). En estructuras 3D, los arreglos regulares piramidal y tetraédrico (figura 2b) se presentan en las partículas más cercanas al fondo del recipiente.

En mezclas granulares, la variación del número de discos intersecados por sondeos rectos (NDI) o del número de esferas intersecadas por planos de corte (NEI), es un índice de la presencia predominante de partículas grandes o pequeñas. Sin embargo, la estructuración espontánea ocasiona que NDI y NEI (en sondeos y cortes horizontales) se incrementen muy por encima de su va-

lor medio en las zonas de traslape entre partículas (figura 3). En sondeos y cortes verticales, la variación de NDI y NEI es muy pequeña. Se observa un efecto de las paredes laterales que no se propaga al interior de las estructuras. La figura 4 ilustra las señales de estas variables en sondeos y cortes verticales. La tabla 1 resume los resultados de 15 simulaciones 2D y 10 simulaciones 3D. Se concluye que la segregación puede medirse con los coeficientes de variación CV_{NDI} y CV_{NEI} en sondeos y cortes verticales con la eliminación del efecto de las paredes, tomando como referencia de segregación mínima los CV de granulometrías uniformes.

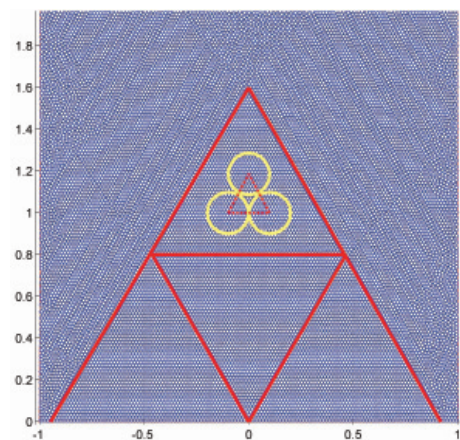
Granulometría bimodal

Al graficar el coeficiente de variación CV_{NDI} o CV_{NEI} obtenido en cada estructura granular, es posible observar el efecto de las variables granulométricas sobre la segregación (figura 5). Entre mayor sea este coeficiente, mayor es la segregación.

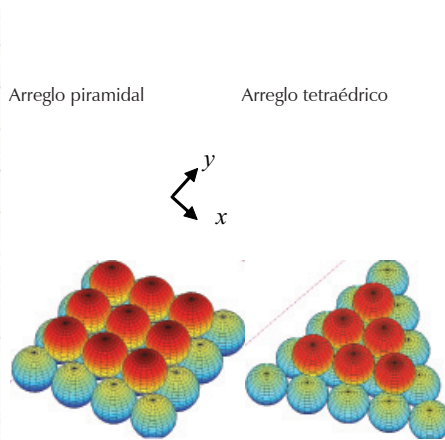
Cuando la estructura granular está constituida principalmente por una clase de partículas (de partículas pequeñas si p_{2A} o $p_{3V} \rightarrow 1$ y de partículas grandes si p_{2A} o $p_{3V} \rightarrow 0$), no hay segregación. Si la proporción de partículas pequeñas es aproximadamente 0.3, la segregación es más pronunciada. Respecto a la relación $\alpha = D_{m\acute{a}x} / D_{m\acute{i}n}$, a mayores diferencias entre los tamaños de las partículas, mayor es la segregación.

Otro parámetro para la medición de la segregación es la distancia mínima entre los centros de partículas iguales. Considerando las partículas pequeñas, se mide la distancia del centro de cada partícula al de la más cercana, se toma la media como medida representativa y se divide por el diámetro de las partículas para eliminar dimensiones (T/D). Lo mismo se hace con las partículas grandes y la segregación de la estructura se caracteriza con el promedio (τ) de las dos medidas representativas. La figura 6 muestra los resultados en estructuras 2D, mientras que la segregación en estructuras 3D se muestra numéricamente en la tabla 2.

a) Estructura 2D



b) Partículas del fondo del recipiente, estructura 3D



La figura 6 muestra los resultados en estructuras 2D, mientras que la segregación en estructuras 3D se muestra numéricamente en la tabla 2.

Figura 2. Estructuras de granulometría uniforme

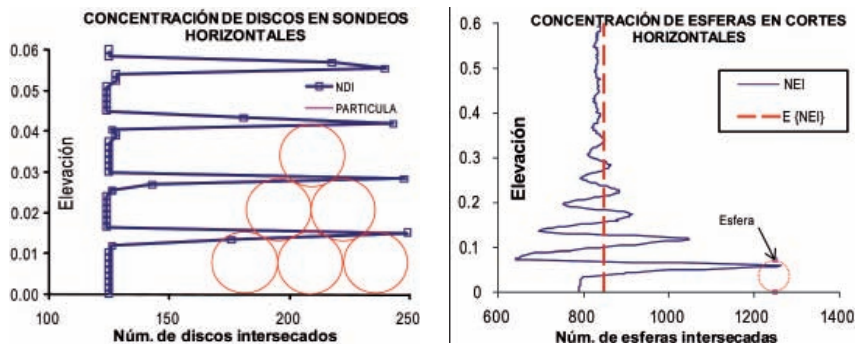


Figura 3. Concentración espacial de partículas iguales en sondeos y cortes horizontales

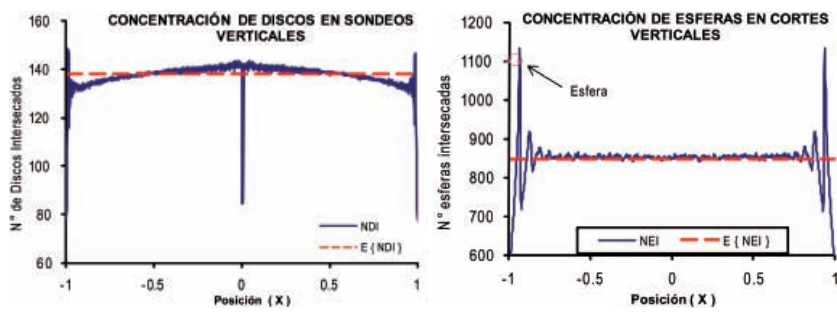


Figura 4. Concentración espacial de partículas iguales en sondeos y cortes verticales

		Estructuras bidimensionales			Estructuras tridimensionales		
		SONDEO	Horizontal	Vertical	CORTE	Horizontal	Vertical
Media	NDI		137	137	NEI	830	846
	NDI*		131	136	NEI*	827	853
	E {NDI}		138		E {NEI}	848	
Coef. var.	n		11.8%		n	0.416	
	NDI		13.1%	4.5%	NEI	5.3%	6.1%
	NDI*		4.0%	2.3%	NEI*	0.55%	0.48%
	n		3.7%		n	1.3%	

Tabla 1. Características de las estructuras de granulometría uniforme

Características de las estructuras de granulometría uniforme

* Se eliminaron los efectos de las paredes

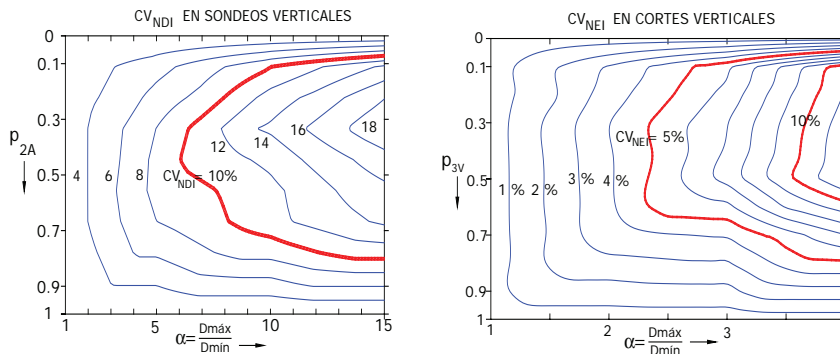


Figura 5. Segregación en estructuras de granulometría bimodal, criterio de concentración de partículas

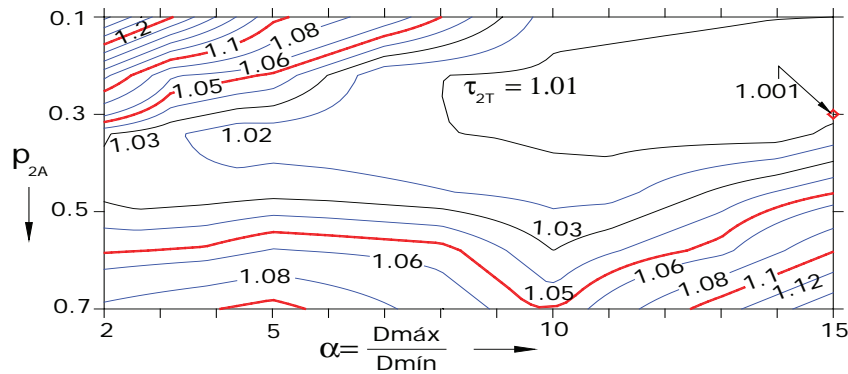


Figura 6. Segregación en estructuras 2D de granulometría bimodal, criterio de distancia entre centros

Tabla 2. Segregación en estructuras 3D de granulometría bimodal, criterio de distancia entre centros

Granulometría			Distancias			Granulometría			Distancias		
α	p_{3V}	q_{3V}	$\bar{T}i/D_{min}$	$\bar{T}i/D_{max}$	τ_{3T}	α	p_{3V}	q_{3V}	\bar{T}/D_{min}	\bar{T}/D_{max}	τ_{3T}
2	0.1	0.9	1.148	1.000	1.074	2	0.5	0.5	1.0009	1.0049	1.003
3	0.1	0.9	1.075	1.000	1.037	3	0.5	0.5	1.0004	1.0066	1.004
4	0.1	0.9	1.031	1.000	1.016	4	0.5	0.5	1.0002	1.0021	1.0012
2	0.3	0.7	1.0085	1.0002	1.004	2	0.7	0.3	1.0002	1.0599	1.030
3	0.3	0.7	1.0031	1.0004	1.002	3	0.7	0.3	1.0001	1.0687	1.034
4	0.3	0.7	1.0019	1.0000	1.0010	4	0.7	0.3	1.0000	1.0470	1.024

Los resultados son similares al criterio de la concentración espacial de partículas; las estructuras con $p_{2A} = 0.3$ son las más segregables (la distancia mínima entre partículas es menor y por tanto tienden a agruparse) y la segregación se incrementa con el aumento de $\alpha = D_{max}/D_{min}$. En estructuras 3D el campo de estudio quedó limitado porque se tuvieron dificultades para representar el libre paso de las partículas pequeñas entre las grandes que puede ocurrir cuando $\alpha > 6$.

Los resultados muestran que la segregación inherente en las estructuras de granulometría bimodal es apreciable (figura 7) y se manifiesta más en estructuras 3D.

Granulometría continua

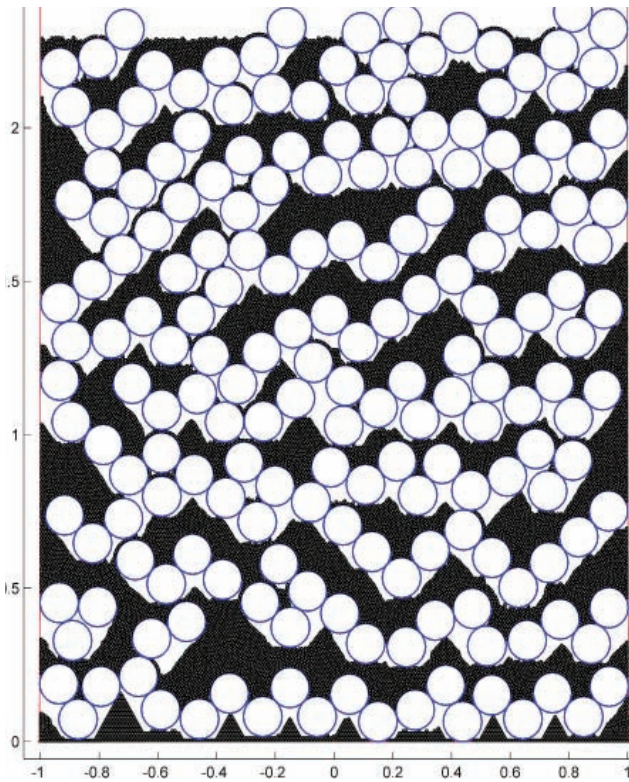
Con anterioridad, se admitió que las variaciones aleatorias de NDI y NEI (concentración espacial de partículas) en sondeos y cortes verticales se relacionan razonablemente con la segregación. Los coeficientes de variación de estas variables obtenidos en cada estructura simulada se muestran en la figura 8.

La segregación se incrementa con el aumento de α y las granulometrías con mayor proporción de partículas grandes ($\gamma = 0$) son menos segregables. La segregación tiene una mayor dependencia de la relación de tamaños.

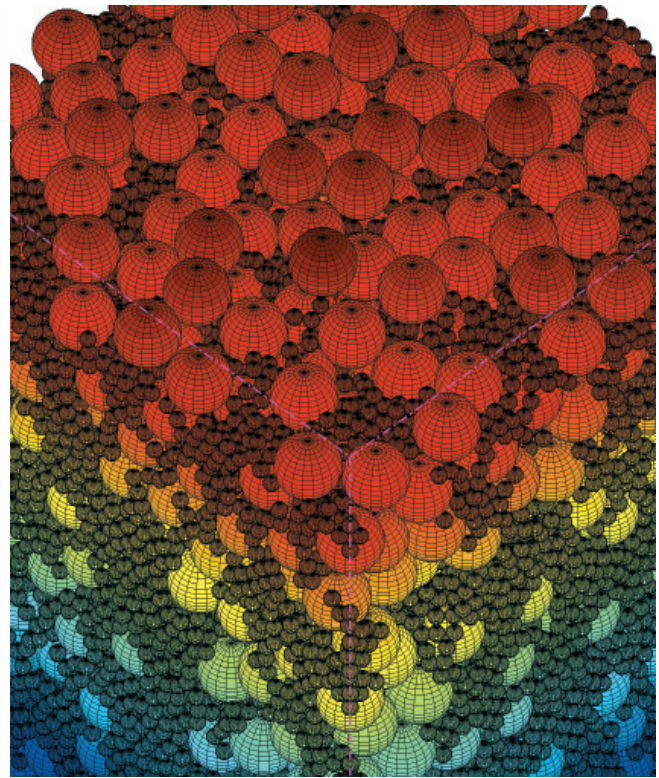
Por otra parte, para aplicar el criterio de la distancia mínima entre centros de partículas similares, la granulometría se dividió en diez fracciones granulométricas $[D_{min} - D_{10}]$, ... $[D_{90} - D_{max}]$, cada una con el 10% de los sólidos. La comparación de las densidades de probabilidad Poissonianas (sin segregación) contra las observadas en las estructuras granulares es de utilidad para observar el estado de agrupación de las partículas de cada fracción (figura 9b).

En la figura 9a, se considera la distancia media normalizada de cada fracción para evaluar la segregación (ejemplo de estructura 3D).

La segregación forzada es una referencia que corresponde a una estructura donde las partículas de la misma granulometría se colocan en orden ascendente de tamaño.



Estructura bidimensional de granulometría bimodal con $p_{2\lambda} = 0.3$, $\alpha = 15$



Estructura tridimensional de granulometría bimodal con $p_{3\nu} = 0.3$, $\alpha = 4$

Figura 7. Ejemplos de estructuras granulares simuladas

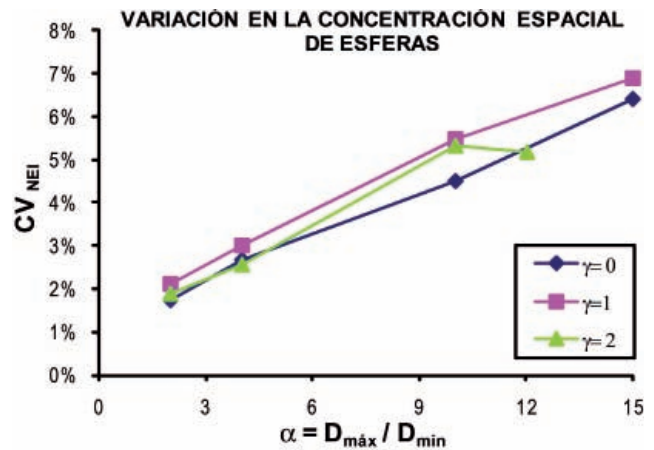
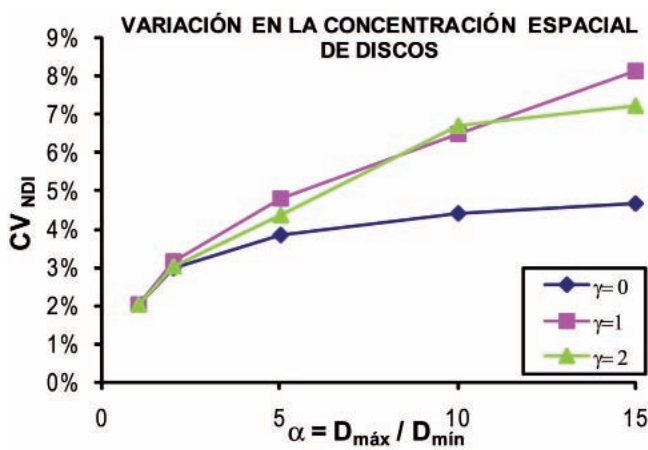


Figura 8. Segregación en estructuras de granulometría continua, criterio de concentración de partículas

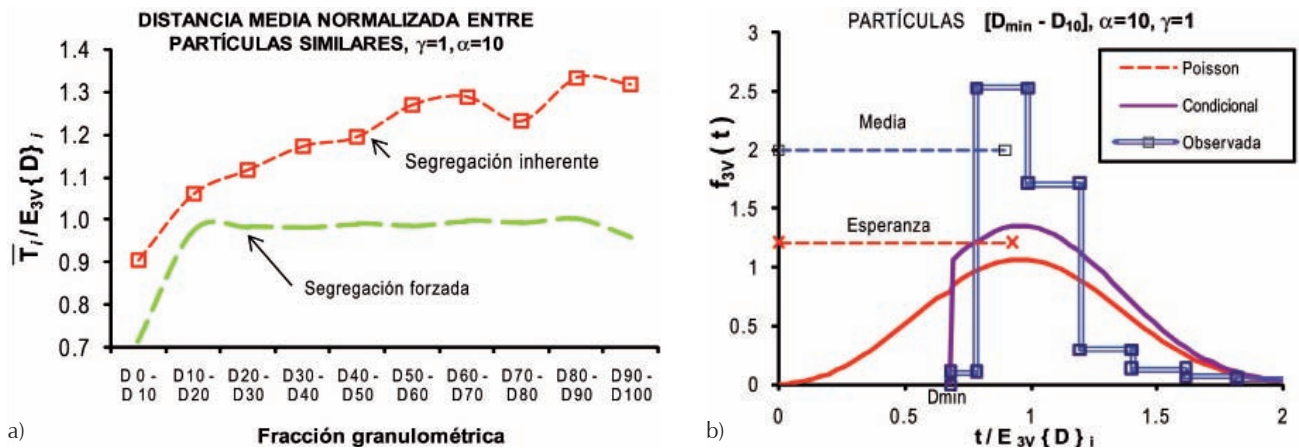


Figura 9. Segregación por fracción granulométrica, granulometría continua 3D

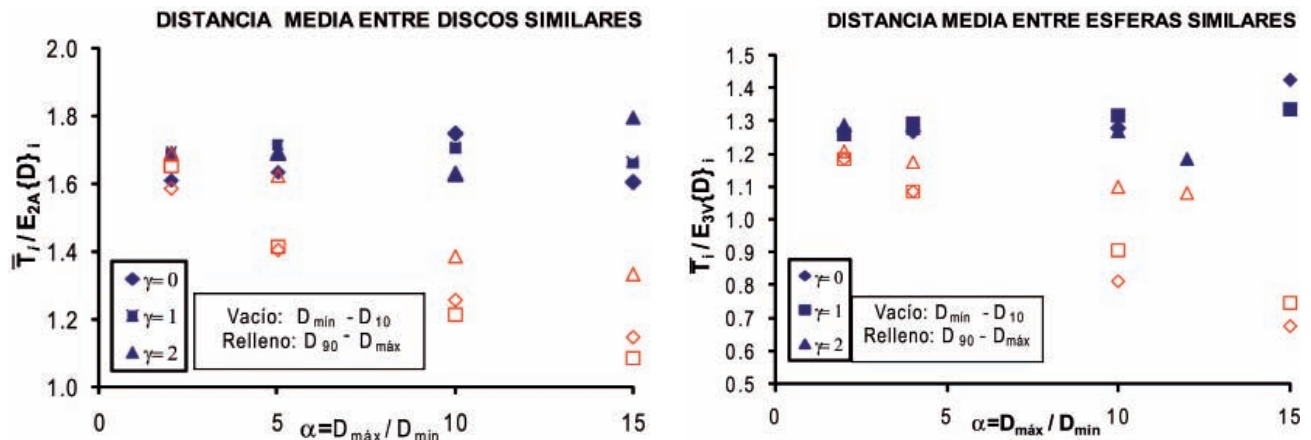


Figura 10. Segregación en estructuras de granulometría continua, criterio de distancia entre partículas

Para observar el efecto de la granulometría se consideran las partículas más pequeñas y más grandes de cada estructura simulada. Las partículas pequeñas se segregan cada vez más cuando se incrementa la relación α , pero las partículas grandes no tienden a agruparse (figura 10). El efecto del coeficiente de distribución granulométrica (γ) es poco relevante.

Implicaciones prácticas

Respecto de la estructuración espontánea y la segregación, se recalcan las siguientes implicaciones que estos fenómenos pueden tener en los problemas prácticos de la ingeniería geotécnica:

A la escala de los grupos de partículas, como los que se vieron en las simulaciones realizadas, los medios granulares son naturalmente heterogéneos y anisótopos, debido a la estructuración espontánea y a la segregación inherente.

Debe esperarse que la heterogeneidad y anisotropía mencionadas se reflejen en el comportamiento mecánico e hidráulico de muestras constituidas por un número limitado de partículas (efecto de escala).

En los problemas prácticos de la geotecnia y otras disciplinas, se debe tomar en cuenta que las granulometrías discontinuas son más segregables que las continuas.

Los suelos que abarcan un amplio intervalo de diámetros de partícula (valores altos de $D_{m\acute{a}x} / D_{m\acute{i}n}$) son más segregables.

Conclusiones

Se realizó un estudio de la segregación inherente existente en medios granulares. El modelo de simulación empleado permitió estudiar un campo relativamente amplio de granulometrías y las variables de medición consideradas permitieron diferenciar la estructuración

espontánea de la segregación. La estructuración espontánea es más evidente en estructuras de partículas uniformes. En granulometrías bimodales, la segregación es más pronunciada cuando las partículas pequeñas representan el 30% del total de los sólidos. En granulometrías continuas, la segregación afecta en mayor grado a las partículas más pequeñas. En ambas granulometrías, entre mayor sea el intervalo de tamaños de partículas ($D_{m\acute{a}x}/D_{m\acute{i}n}$) mayor es la segregación inherente. Además, las estructuras granulares tridimensionales son más segregables que las bidimensionales.

Referencias

- Auvinet G. Generation of Granular Media by Computer. Buenos Aires, Argentina, *Fifth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1972.
- Auvinet G. *Estructura de los medios granulares*. Tesis (Doctorado en Ingeniería), México DF, DEPEFI, Universidad Nacional Autónoma de México, 1986.
- Boutreux T.H.A., Makse P.G. de Gennes. Surface Flows of Granular Mixtures. *The European Physical Journal B*, 9:110–115, 1999.
- Carson J., Royal T., Goodwill D. Understanding and Eliminating Particle Segregation Problems. *Bulk Solids Handling*, 16:139–134, 1986.
- Khakhar D., McCarthy J., Ottino J. Mixing and Segregation of Granular Materials in Chute Flows. *American Institute of Physics*, 9(3):594–610, 1999.
- Navakas-Robertas. *Simulation of Motion of Granular Media in Complex Mechanical Systems*. Kaunas, Lithuania, Lithuanian Energy Institute, 2006.
- Ottino J.M., Khakhar D.V. Mixing and Segregation of Granular Materials. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32:55–91, 2000.
- Rapaport D. *Mechanism for Granular Segregation*. Physical review, Israel, Physics Department, Bar – Ilan University, Ramat Gan, 2001.
- Sánchez-Guzmán J. *Contribución al estudio de la segregación de medios granulares*. Tesis (Maestría en ingeniería). México DF, Programa de maestría y doctorado en ingeniería, UNAM, 2009.
- Savage S.B., Lun C.K.K. Particle-Size Segregation in Inclined Chute Flow of Dry Cohesionless, Granular Solids. *Journal of Fluid Mechanics*, 189:311–335, 1988.
- Schröter M., Ulrich S., Kreft J, Swift J, Swinney H. *Mechanisms in the Size Segregation of a Binary Granular Mixture*. Center for Nonlinear Dynamics and Department of Physics, University of Texas at Austin, Physical review E74, 011307, 2006.
- Sherard J., Dinnungan L., Talbot J. Basic Properties of Sand and Gravel Filters. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, 110(GT6), 1984a.
- Sherard J., Dinnungan L., Talbot J. Filters for Silts and Clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, 110(GT6), 1984b.
- Zurigueta I. *Movimiento de convección en un medio granular agitado verticalmente*. España, Departamento de Física y Matemática Aplicada, Universidad de Navarra, 2003.

Semblanza de los autores

Jesús Sánchez-Guzmán. En 2005 se graduó como ingeniero en irrigación por la Universidad Autónoma Chapingo. Realizó estudios de maestría en ingeniería civil en el programa de maestría y doctorado de la UNAM. Tanto en el examen profesional como en el de grado obtuvo mención de honor. Actualmente se desempeña como ingeniero en el Departamento de Mecánica de Rocas e Inyecciones de la Comisión Federal de Electricidad.

Gabriel Auvinet-Guichard. Se graduó como ingeniero civil en la Ecole Spéciale des Travaux Publics de Paris en 1964. Obtuvo el grado de doctor en ingeniería en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México en 1986. Ha sido profesor invitado en las Universidades francesas de Grenoble (1986), Nancy (1993-1994) y de Clermont (2003-2004). Fue subdirector del Instituto de Ingeniería de la UNAM y presidente de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (1992-1993). Ha recibido distintos premios y reconocimientos, incluyendo el premio “Larivière” del CNAM de Paris, Francia, y el premio “Javier Barrios Sierra” del Colegio de Ingenieros Civiles de México. Es profesor honorario de las universidades Ricardo Palma y Antenor Orrego, Perú. Es miembro de la Academia de Ciencias y de la Academia Nacional de Ingeniería de México. Ha dedicado su trabajo de investigación a problemas de mecánica de suelos con énfasis en la ingeniería de cimentaciones en suelos blandos en zonas sísmicas y en presencia de hundimiento regional. En este campo, su trabajo se ha concentrado particularmente en el análisis del comportamiento de cimentaciones sobre pilotes de fricción y de punta. Actualmente dirige el laboratorio de Geoinformática del Instituto de Ingeniería de la UNAM y es Vice-Presidente por Norte América de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.