



ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DE FALLA DE UNA ZAPATA CIMENTADA SOBRE UN SUELO CON PROPIEDADES VARIABLES.

ARÉVALO MARTINEZ ANA MARÍA

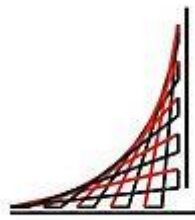
PRESENTADO A:

ING. LINA XIMENA GARZÓN ÁVILA

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C. DICIEMBRE DE 2017



ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

PROYECTO DIRIGIDO.

ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DE FALLA DE UNA ZAPATA CIMENTADA SOBRE UN SUELO CON
PROPIEDADES VARIABLES.

INFORME ANALISIS DE IMÁGENES.

ANA MARÍA ARÉVALO MARTÍNEZ

LINA XIMENA GARZÓN ÁVILA
INGENIERA

CENTRO DE ESTUDIOS GEOTÉCNICOS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
BOGOTA D.C
18 DE DICIEMBRE DEL 2017

RESUMEN

El estudio de los suelos a través de los años ha sido complejo, dado que las propiedades del suelo son tan variables generan inquietud en cuanto a su comportamiento frente a cargas y su falla en respuesta a la misma. Se han realizado estudios de análisis numéricos basados en la teoría de campos aleatorios y elementos finitos para los efectos de la heterogeneidad del suelo sobre la capacidad de una cimentación poco profunda, alguno de los personajes que han investigado este tema son Fenton & Griffiths, Popescu, Al-Bittar & Soubra, Hicks & Spencer, Kazama & Zen, Huber, Haldar & Babu.

Hoy en día se realizan prototipos con similares características a la composición de algún suelo en estudio, a estos prototipos se les somete a una carga superficial con el propósito de prever la forma en la que va a fallar, para lograr la semejanza del prototipo y la realidad se aumenta la gravedad y se carga el suelo, por lo cual se usan las centrifugas geotécnicas que son las encargadas de aumentar esta gravedad y así el prototipo el esfuerzo del suelo sea el mismo, así entonces se estudia el comportamiento y validan modelos numéricos.

Con el propósito de entender el comportamiento de la heterogeneidad del suelo en las deformaciones del terreno, se realizaron 30 ensayos de capacidad de carga en vuelo de una única base rígida apoyada sobre una variación espacial sobre el mismo suelo variable en centrifuga divididos en tres grupos diferenciados por la longitud, analizadas en un software el cual interpreta la diferencia del movimiento entre dos imágenes y agrega vectores con tamaño y dirección correspondiente al movimiento, en promedio cada falla estudiada tiene doce imágenes consecutivas, con ayuda de este software se identifica con más claridad el movimiento.

PALABRAS CLAVE: Variabilidad espacial del suelo, Capacidad de Carga, Centrifuga geotécnica, Prueba de capacidad de carga, Prototipo.

ABSTRACT

The study of soils over the years has been complex, given that the soil properties are so variable, they generate uncertain regarding their behavior against loads and their failure in response to it. Numerical analysis studies have been carried out based on the theory of random fields and finite elements for the effects of soil heterogeneity on the capacity of a shallow foundation, some of the characters that have investigated this issue are Fenton & Griffiths, Popescu, Al-Bittar & Soubra, Hicks & Spencer, Kazama & Zen, Huber, Haldar & Babu.

Today prototypes are made with characteristics such as the composition of some soils under study, these prototypes are used for a surface load in order to prevent the way in which it will fail, to achieve the similarity of the prototype and the reality is increased gravity and load the soil at the same time, so the geotechnical centrifuges are used that are responsible for increasing this gravity and thus the prototype the effort of the sea floor itself, then the behavior is studied and validated numerical models.

In order to understand the behavior of soil heterogeneity in terrain deformations, 30 test of "in-flight load capacity" were performed on a single rigid base supported on a spatial variation on the same variable ground in a centrifuge divided into three differentiated groups for the length, analyzed in a software which interprets the difference of movement between two images and adds vectors with size and direction corresponding to the movement, on average each failure studied has twelve consecutive images, with the help of this software it is more clearly identified movement.

KEYWORDS: Spatial variability of the soil, capacity of a shallow foundation, geotechnical centrifuge, load capacity tests, prototype.

Contenido

1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	7
2. CONCEPTOS GENERALES.....	7
3.2.1 DESARROLLO DE LA SUPERFICIE DE FALLA.....	8
.....	9
3.3.2 TEORIAS DE MECANISMO DE FALLA.....	9
- Falla general por corte	9
Una cimentación descansa sobre un suelo, con un ancho igual a B, si la carga se aplica gradualmente, el asentamiento incrementa, cuando suceda la falla repentina, la zona de falla del suelo se extenderá hasta la superficie del terreno (Ilustración 2).....	9
- Falla local de corte	10
- Falla de corte por punzamiento	10
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	11
5. MODELO.....	21
6. PASOS ESTUDIO DE ANALISIS IMAGENES.....	24
10. RESULTADOS OBTENIDOS.....	0
11. CONCLUSIONES GENERALES.....	0
12. BIBLIOGRAFIA.....	0

Tabla de Ilustraciones.

Ilustración 1. Desarrollo de la superficie de falla (Adaptado de: Capacidad de Carga – Cimentaciones Superficiales, Ing. Wilfredo Gutiérrez Lazares).	9
Ilustración 2. Falla general por corte. (Tomado de: Capítulo 3, cimentaciones superficiales: capacidad de carga).	9
Ilustración 3. Falla local por corte, (Tomado de: Capítulo 3, cimentaciones superficiales: capacidad de carga).	10
Ilustración 4. Falla de corte por punzamiento, (Tomado de: Capítulo 3, cimentaciones superficiales: capacidad de carga).	10

Ilustración 5. Malla utilizada en el análisis de capacidad probabilística. (Tomado de: Bearing capacity of spatially random soil the undrained clay prandtl GRIFFITHS 2001)	12
Ilustración 6. Curvas típicas de carga/deformación, para el ensayo de capacidad de carga de una arcilla no drenada. (Tomado de: Bearing capacity of spatially random soil the undrained clay prandtl GRIFFITHS 2001).....	13
Ilustración 7. Malla típica deformada en escala de grises al fallar- Las regiones más oscuras indican suelo más débil. (Tomado de: Bearing capacity of spatially random soil the undrained clay prandtl GRIFFITHS 2001).....	13
Ilustración 8. Vectores de desplazamiento, para la ilustración anterior. (Tomado de: Bearing capacity of spatially random soil the undrained clay prandtl GRIFFITHS 2001)	14
Ilustración 9. Malla usada en el análisis de capacidad de carga probabilística (Tomado de: Bearing capacity of rough rigid strip footing on cohesive GRIFFITHS 2002).	15
Ilustración 10. Vector de desplazamiento en una falla por una zapata en un análisis determinante. (Tomado de: Bearing capacity of rough rigid strip footing on cohesive GRIFFITHS 2002).....	15
Ilustración 11. Campos de suelo aleatorio. (Tomado de: Bearing capacity of rough rigid strip footing on cohesive GRIFFITHS 2002).	16
Ilustración 12. Mallas deformadas típicas y el gráfico de desplazamiento correspondiente para algunas relaciones. (Tomado de: Bearing capacity of rough rigid strip footing on cohesive GRIFFITHS 2002).	17
Ilustración 13. Resultados de las pruebas de penetración in situ. (Tomado de: Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity POPESCU 2005).....	18
Ilustración 14. Modelos normalizados Beta y Gamma. (Tomado de: Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity POPESCU 2005).....	19
Ilustración 15. Malla de elementos finitos. (Tomado de: Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity POPESCU 2005).	19
Ilustración 16. Mecanismo de falla. (Tomado de: Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity POPESCU 2005).	20
Ilustración 17. Fuerza de cizalladura del suelo. (Tomado de: Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity POPESCU 2005).	20
Ilustración 18. Fuerza de cizalladura máxima. (Tomado de: Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity POPESCU 2005).	20
Ilustración 19. Relación del modelo y el prototipo. (Tomado de: Mecánica de suelos aplicada – MSUA – Cimentaciones superficiales, MS.c. Lina Ximena Garzón Avila.)	21
Ilustración 20. Parámetros y sus relaciones del modelo y prototipo. (Tomado de: Mecánica de suelos aplicada – MSUA – Cimentaciones superficiales, MS.c. Lina Ximena Garzón Avila.).....	21
Ilustración 21. Imagen de la centrifuga de los Andes. (Tomado de: Mecánica de suelos aplicada – MSUA – Cimentaciones superficiales, MS.c. Lina Ximena Garzón Avila.)	22
Ilustración 22. Centrifuga geotécnica. (Tomado de: Mecánica de suelos aplicada – MSUA – Cimentaciones superficiales, MS.c. Lina Ximena Garzón Avila.).....	23
Ilustración 23. Modelo realizado por la Ing. Lina. long 1.5-1 (Tomado por: MS.c. Lina Ximena Garzón Avila).....	24
Ilustración 24. Paso 1.	24
Ilustración 25. Paso 2.	0

Ilustración 26. Paso 3. 0
Ilustración 27. Paso 4. 1
Ilustración 28. Paso 5. 2
Ilustración 29. Paso 6. 2
Ilustración 30. Paso 7. 3
Ilustración 31. Paso 8. 4
Ilustración 32. Paso 9. 4
Ilustración 33. paso 10. 5
Ilustración 34. Paso 11. 6
Ilustración 35. Paso 12 6
Ilustración 36. Paso 13. 7
Ilustración 37. Paso 14. 8

INTRODUCCIÓN.

Las poblaciones han crecido a través de los años afectando directamente la infraestructura de la región, haciendo presente estructuras como vías, puentes, viviendas, estructuras de agua potable y residual. En ciudades como Bogotá el grado de consolidación del suelo hace necesario el uso de estructuras de soporte.

La teoría de cimentaciones superficiales sometidas a una carga y su falla en forma de cuña está basada en suelos homogéneos en los que se desprecia la variabilidad inherente del suelo, por lo cual los suelos reales son los suelos heterogéneos y tienen este comportamiento gracias a los procesos geológicos. Dada la heterogeneidad presentan un comportamiento aleatorio, el cual se caracteriza usando ciertos parámetros estadísticos.

El proyecto se realizó en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, dirigido por la ingeniera Lina Ximena Garzón Ávila, siendo este un complemento de su investigación para su Doctorado en la universidad de los Andes, inicialmente la ing. Lina realizó los prototipos con suelo variable y se llevaron a cabo un grupo de ensayos en la mini centrifuga de la universidad de los Andes en un arreglo espacial bidimensional de tres suelos, para la creación de estos suelos se usó una combinación entre caolín y bentonita fijando el límite líquido, se quiso simular los valores típicos del límite líquido de un suelo de la Sabana de Bogotá de allí se determinó la media, la desviación estándar, la longitud de correlación, y el tamaño del espacio de discretación, se sometieron a una carga superficial en la mini centrifuga geotécnica y se grabó cada instante del movimiento hasta la falla, con base en el video se tomaron capturas de momentos en concreto obteniendo así imágenes que progresivamente reflejan la falla, se estudiaron estas imágenes en MATLAB un software que con complemento de PIVlab para la lectura de imágenes arrojaron vectores en dirección del movimiento de las mismas, finalmente se analizaron los resultados de las imágenes y clasificaron las diferentes fallas.

1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.

- Realizar un análisis de imágenes con ayuda de un software de las fallas de diferentes tipos de suelos, clasificar las fallas.
- Tener claridad sobre los mecanismos de falla de un suelo homogéneo y uno heterogéneo.
- Estudiar la modelación matemática con la que se han realizado diferentes estudios de análisis numéricos.
- Identificar los mecanismos de falla en un suelo en el sus propiedades varían espacialmente.

2. CONCEPTOS GENERALES.

3.1 CIMENTACION SUPERFICIAL.

Básicamente una cimentación se define como el conjunto de elementos estructurales que transmiten cargas al suelo, distribuyéndolas. Inevitablemente se producirán deformaciones en el suelo, lo que se quiere es diseñar una cimentación teniendo en cuenta las características del suelo y la estructura con el fin de evitar asentamientos perjudiciales.

Las cimentaciones superficiales tienen suficiente capacidad portante o cuando se trata de construcciones de importancia secundaria y relativamente livianas. Por lo cual la idea de la ingeniería de cimentaciones es transmitir de manera eficaz y económica cargas estructurales al terreno, evitando los asentamientos.

Las cimentaciones son de gran importancia para cualquier estructura, de ahí la importancia de conocer el comportamiento del suelo frente a las mismas.

En este proyecto los modelos se sometieron a una carga superficial, con carga controlada, es decir hasta que llegaron a la falla.

3.2 SUELOS HOMOGENEOS.

Son suelos teóricos que poseen características comunes en su extensión, es decir su estructura es uniforme.

3.2.1 DESARROLLO DE LA SUPERFICIE DE FALLA.

A continuación se presenta una explicación técnica de la forma en la que el suelo (ilustración 1) al ser sometido a una carga superficial se convierte en inestable. Dado que la carga se aplica gradualmente a la superficie, el asentamiento se incrementa también, en algún punto por la carga sucederá una falla repentina y la zona de falla en el suelo se extenderá hasta la superficie, cuando esta falla ocurre se le llama *falla general por corte*.

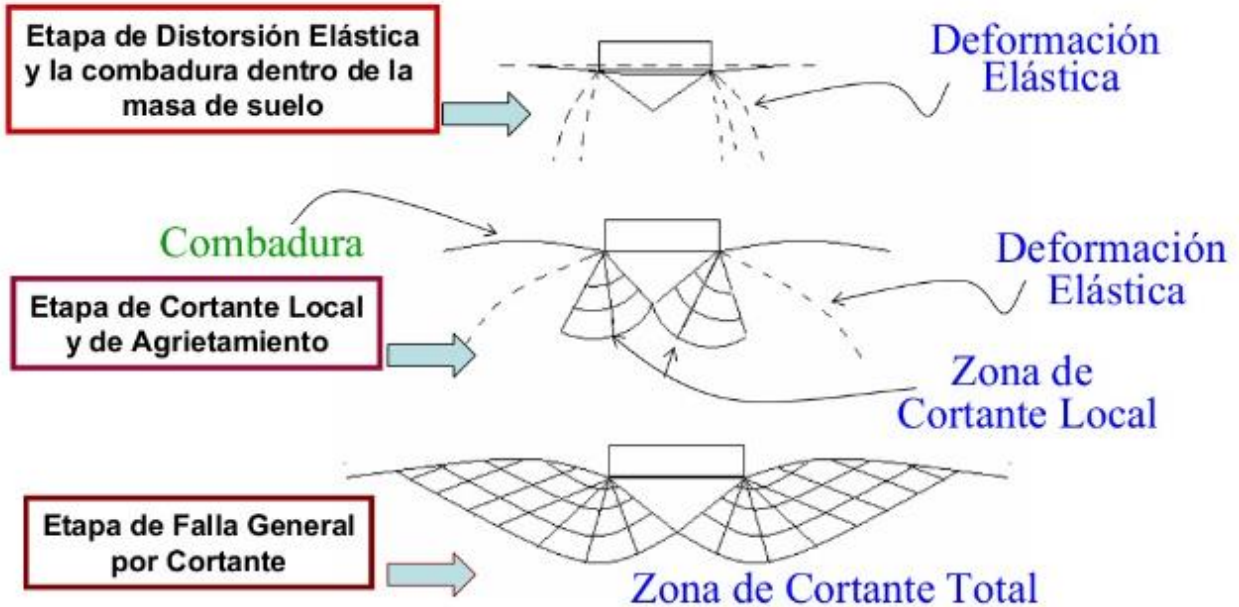


Ilustración 1. Desarrollo de la superficie de falla (Adaptado de: Capacidad de Carga – Cimentaciones Superficiales, Ing. Wilfredo Gutiérrez Lazares).

3.3.2 TEORIAS DE MECANÍSMO DE FALLA.

- Falla general por corte.

Una cimentación descansa sobre un suelo, con un ancho igual a B , si la carga se aplica gradualmente, el asentamiento incrementa, cuando suceda la falla repentina, la zona de falla del suelo se extenderá hasta la superficie del terreno (Ilustración 2).

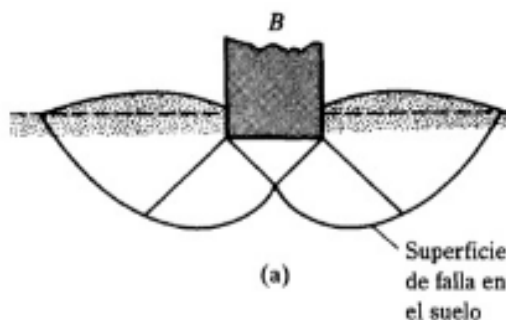


Ilustración 2. Falla general por corte. (Tomado de: Capítulo 3, cimentaciones superficiales: capacidad de carga).

- **Falla local de corte.**

Un incremento de carga sobre la cimentación será acompañado por un aumento del asentamiento. La superficie de falla se extiende gradualmente hacia afuera desde la cimentación, como se ve en las líneas continuas de la siguiente ilustración. Se requiere un movimiento considerable de la cimentación para que la falla logre extenderse hasta la superficie (ilustración 3).

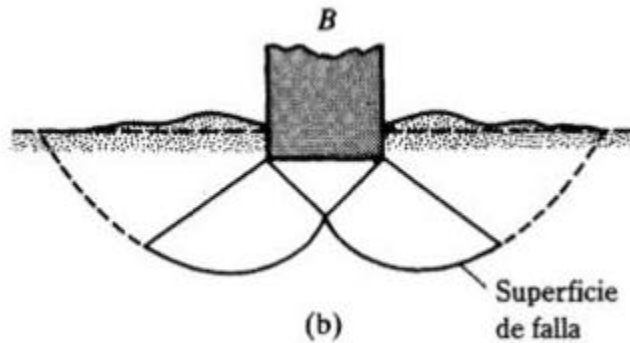


Ilustración 3. Falla local por corte, (Tomado de: Capítulo 3, cimentaciones superficiales: capacidad de carga).

- **Falla de corte por punzamiento.**

Para este caso donde la cimentación está descansando sobre un suelo suelto, la zona de falla no se extiende a la superficie del terreno (ilustración 4).

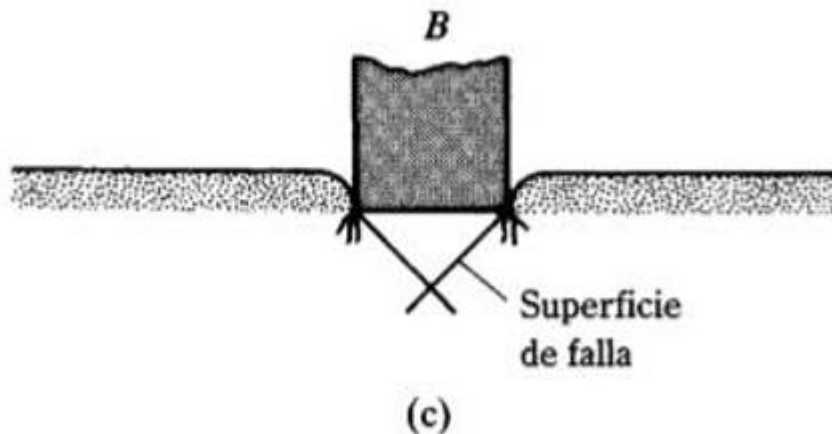


Ilustración 4. Falla de corte por punzamiento, (Tomado de: Capítulo 3, cimentaciones superficiales: capacidad de carga).

3.3 SUELOS HETEROGENEOS.

Sus propiedades varían según la constitución de los materiales que componen la matriz del suelo, la historia geológica de la formación del suelo, y la continua modificación por la naturaleza.

Muy raramente se encuentra un suelo uniforme. En los problemas se trabaja con ese tipo de suelo, pero la realidad es que las propiedades del suelo muestran gran variación en el espacio. Usualmente los estudios geotécnicos se llevan a cabo como el estudio de una sola capa de suelo homogénea, o como un suelo multicapa y estas capas con propiedades uniformes.

Los métodos numéricos como diferencia finita, o métodos finitos de un elemento han facilitado el modelamiento del material uniforme de capas, la variación de las propiedades del suelo en la dirección horizontal generalmente se ignora, es porque la variación horizontal no es significativa para muchas situaciones, y es no es económicamente variable.

Los resultados de los análisis principalmente son aproximaciones de la respuesta y puede ser fácilmente modelada la falla del suelo, particularmente en fallas superficiales que siguen el camino más débil a través del suelo. Los mecanismo de falla en los suelos heterogéneos son impredecibles, comúnmente los suelos con características débiles se unen y la falla suele aparecer a través de estos suelos.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

4.1 PERSONAJES IMPORTANTES.

- Vanmarcke (1984) introdujo toda la base teorica de los Random Fields.
- Backer (1984) aplico la teoría de Vanmarcke a los suelos con el desarrollo del método de las diferencias finitas para resolver una ecuación diferencial particular.
- Fenton y Griffiths (2008) ampliaron el uso de Random Fields a diversas aplicaciones prácticas en el área de la ingeniera geotécnica.
- Gonnouni et ál. (2005), que al emplear el método de *Kriging* evaluaron la influencia que tiene la incertidumbre en el conocimiento de la variabilidad del suelo en la modelación numérica de asentamientos debidos a excavación del suelo.

4.2 Capacidad de carga de un suelo espacial: arcillas no drenadas. Griffiths & Fenton (2001).

Se combinó el análisis del elemento simple elasto-plastico con la teoría de un campo aleatorio, se realizó un ensayo con la intensión de determinar el grado en que la varianza y la correlación espacial de la fuerza cortante no drenada del suelo tienen incidencia el capacidad portante. La longitud de correlación espacial también se muestra como un parámetro importante, los resultados de este ensayo ayudan a explicar el conocido requisito que los ensayos de capacidad de carga requieren factores de seguridad relativamente altos comparados con otras ramas de diseño geotécnico.

Se calculó la deformación en la superficie de un suelo arcilloso no drenado con una resistencia al corte c_u definida por un campo aleatorio variable en el espacio.

El estudio se centró en el factor de capacidad de carga N_c el cual se define como $N_c = \frac{q_f}{c_u}$, q_f es la capacidad de carga, c_u (Kn/m²) es la resistencia al corte no drenada. La longitud espacial (unidades de longitud) describe la distancia sobre la cual los valores espacialmente aleatorios tendrán a correlacionarse en el campo subyacente.

La media se ha mantenido constante a 100Kn/m², la desviación estándar y la longitud de correlación espacial varían simétricamente. Un gran valor de c_u implica un campo de variación suave y un valor bajo de c_u implica un campo raído. Los resultados se muestran en forma de histogramas para así interpretar los resultados en un contexto probabilístico.

BREVE DESCRIPCION DEL MÉTODO DE FE UTILIZADO.

El modelo incorpora tres parámetros, el módulo de young (E), la relación de Poisson y la resistencia al corte no drenado (c_u), el módulo de Young y la relación Poisson se mantuvieron constantes mientras que la resistencia al corte no drenado es aleatorio.

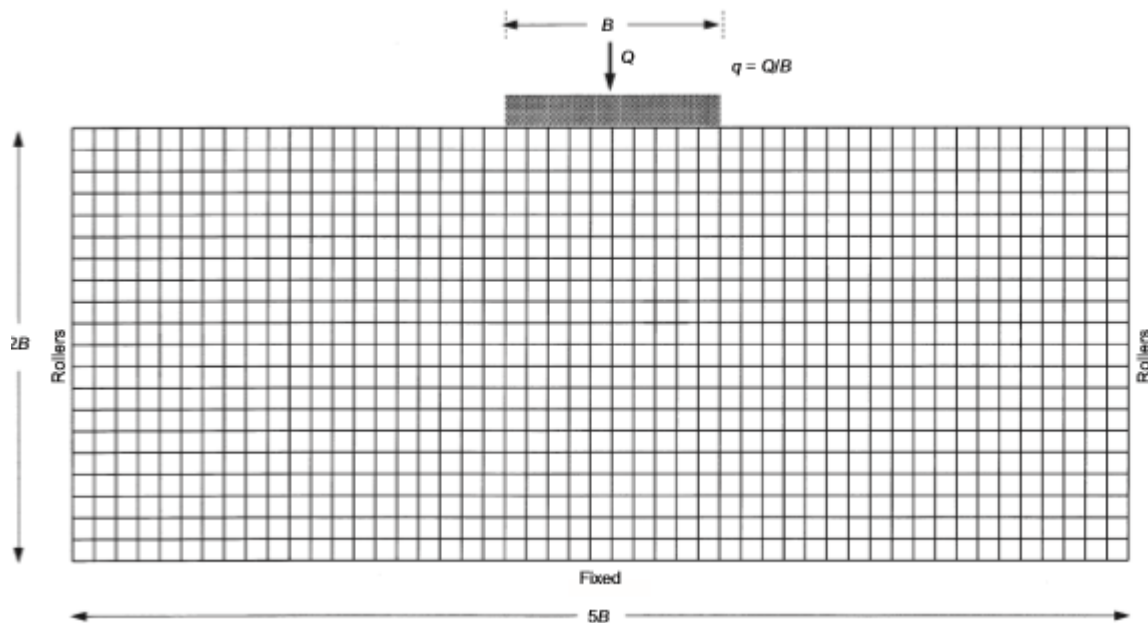


Ilustración 5. Malla utilizada en el análisis de capacidad probabilística. (Tomado de: *Bearing capacity of spatially random soil the undrained clay prandtl* GRIFFITHS 2001)

Malla que consta de 1000 elementos (ilustración 5), con 50 columnas y 20 filas, cada elemento es cuadrado y el ancho de la base es de 10 elementos. La base aplica una carga vertical creando reacciones nodales, cuando la suma de las reacciones nodales llega a un valor estricto se dice que ha llegado a la falla, y la suma de las reacciones nodales dividida por el área de equilibrio es la capacidad de carga (ilustración 6).

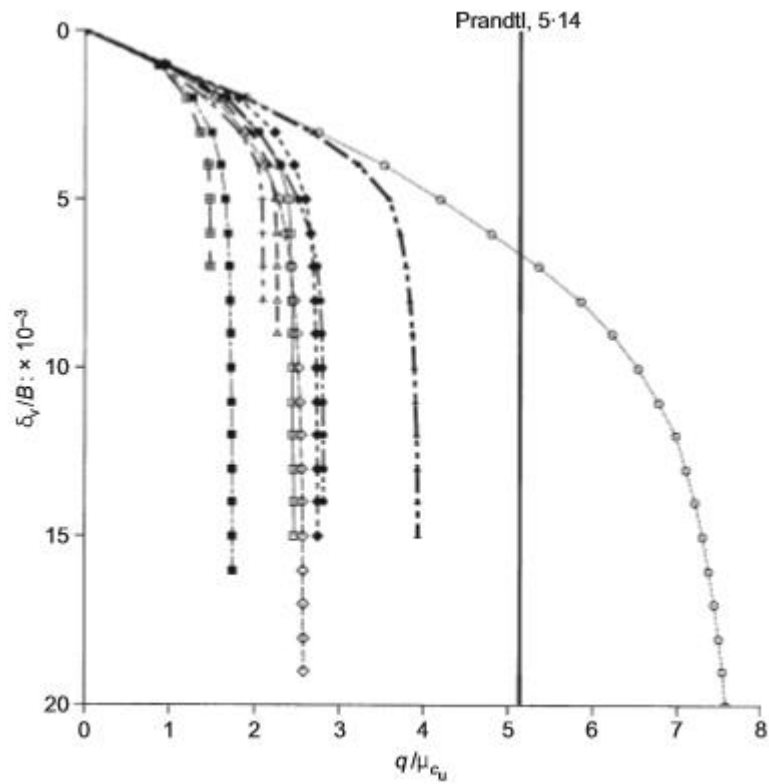


Ilustración 6. Curvas típicas de carga/deformación, para el ensayo de capacidad de carga de una arcilla no drenada. (Tomado de: *Bearing capacity of spatially random soil the undrained clay prandtl GRIFFITHS 2001*)

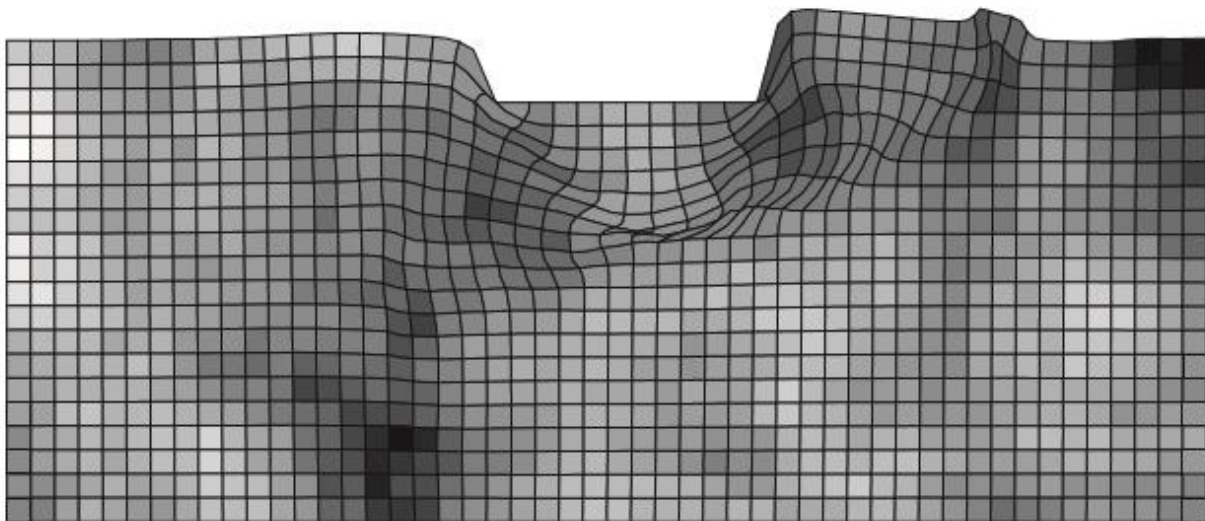


Ilustración 7. Malla típica deformada en escala de grises al fallar- Las regiones más oscuras indican suelo más débil. (Tomado de: *Bearing capacity of spatially random soil the undrained clay prandtl GRIFFITHS 2001*)

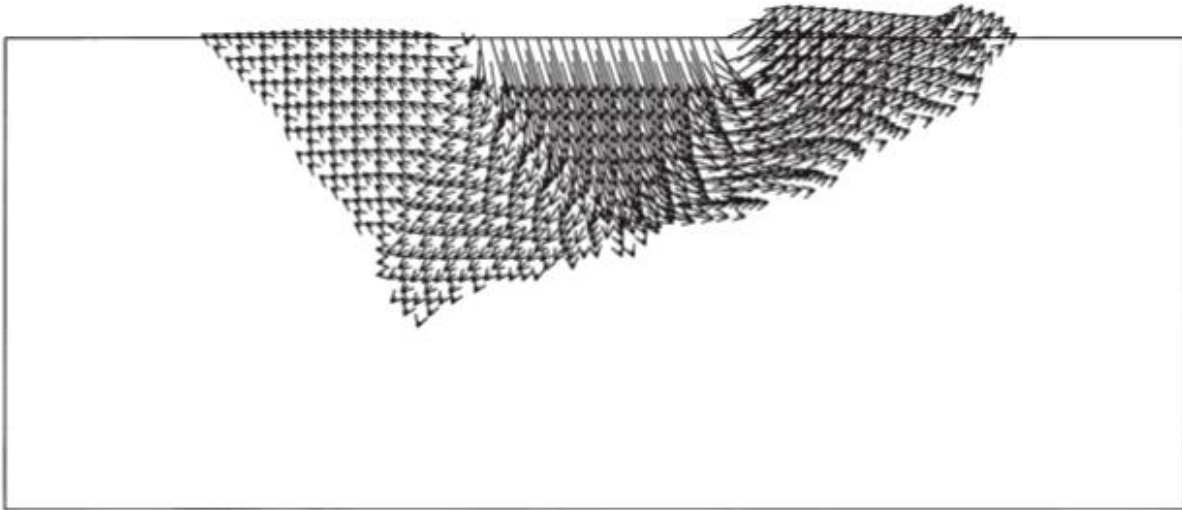


Ilustración 8. Vectores de desplazamiento, para la ilustración anterior. (Tomado de: Bearing capacity of spatially random soil the undrained clay prandtl GRIFFITHS 2001)

La forma asimétrica del mecanismo de falla es evidente (ilustración 8).

En conclusión este artículo demostró que la heterogeneidad de la resistencia del suelo en la forma de una distribución logarítmica normal que varía espacialmente puede reducir significativamente la capacidad de carga media de una base de zapata sobre arcilla no drenada. Cuando la varianza de la resistencia del suelo aumenta, la capacidad de carga disminuye. Para longitudes de correlación de aproximadamente la mitad del ancho de la zapata se observó que tienen una capacidad mínima de carga. Para longitudes ligeramente mas pequeñas se observó aumento en la capacidad de carga.

4.3. CAPACIDAD DE SUSTENTACIÓN DE UNA BASE RÍGIDA EN SUELO COHESIVO: ESTUDIO PROBABILÍSTICO. (GRIFFITHS).

Un estudio probabilístico de la capacidad de carga de una base rígida sobre un suelo cohesivo sin peso se realizó con la intención de evaluar la influencia de alguna fuerza cortante no drenada distribuida al azar.

Los elementos finitos no lineales son fusionados con la teoría del campo aleatorio combinados con el método de Monte Carlo. Los resultados son mostrados en un contexto probabilístico para determinar la probabilidad de falla.

Estudios probabilísticos de la capacidad de carga de zapatas lisas han sido realizados por Fenton y Griffiths, en los estudios previos una distribución logarítmica fue asumida para cohesión y una distribución acotada para el Angulo de fricción. Y esto sería para un caso ideal.

La realidad es que las zapatas son construidas en concreto sobre un base firme del suelo y la superficie entre la zapata y el suelo es lo suficientemente áspera para disminuir la tendencia de deslizamiento

- Método de elementos finitos.

El análisis de capacidad de carga es llevado a cabo por el método de elementos finitos usando un algoritmo visco plástico y elástico-perfectamente plástico (Smith and Griffiths 1998).

El suelo medio es discretizado por elementos de deformación del plano isoparametrico.

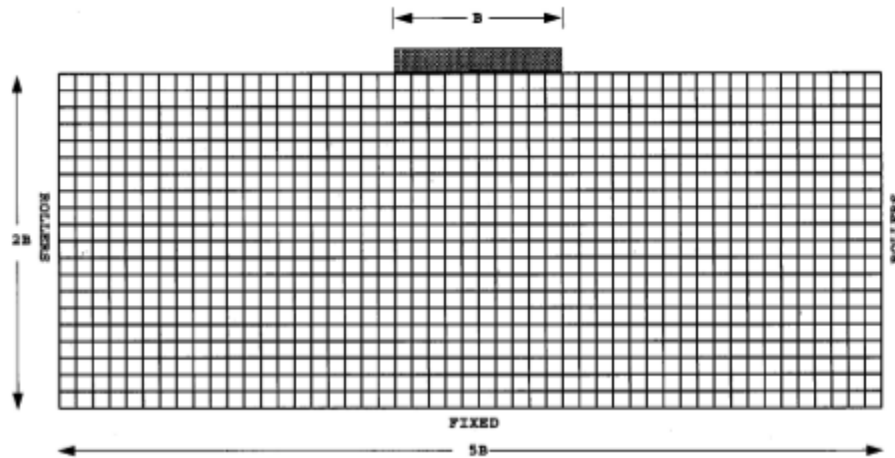


Ilustración 9. Malla usada en el análisis de capacidad de carga probabilística (Tomado de: *Bearing capacity of rough rigid strip footing on cohesive GRIFFITHS 2002*).

Malla usada en el análisis de capacidad de carga probabilística.

Consiste de 1000 nodos (ilustración 9), en 50 columnas y 20 filas, del mismo tamaño con un tamaño de 0.1m, la zapata ocupa a 10 nodos es decir tiene una base de 1m, los nodos que representan la zapata se desplazan verticalmente, simulando una condición de zapata rígida con un asentamiento vertical uniforme pero con cualquier rotación, así como en la realidad la variación espacial de las propiedades del suelo puede causar un movimiento de rotación de la base (ilustración 10).

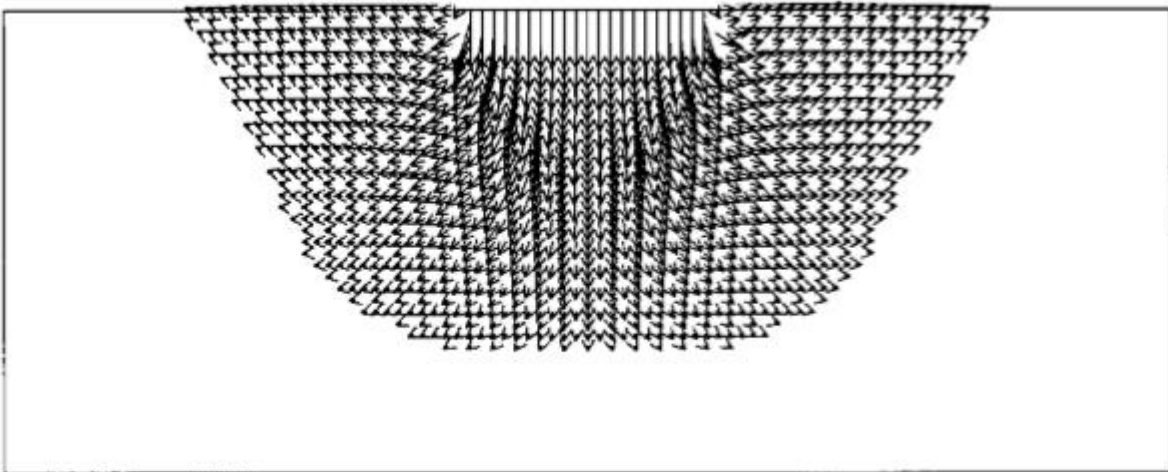


Ilustración 10. Vector de desplazamiento en una falla por una zapata en un análisis determinante. (Tomado de: *Bearing capacity of rough rigid strip footing on cohesive GRIFFITHS 2002*).

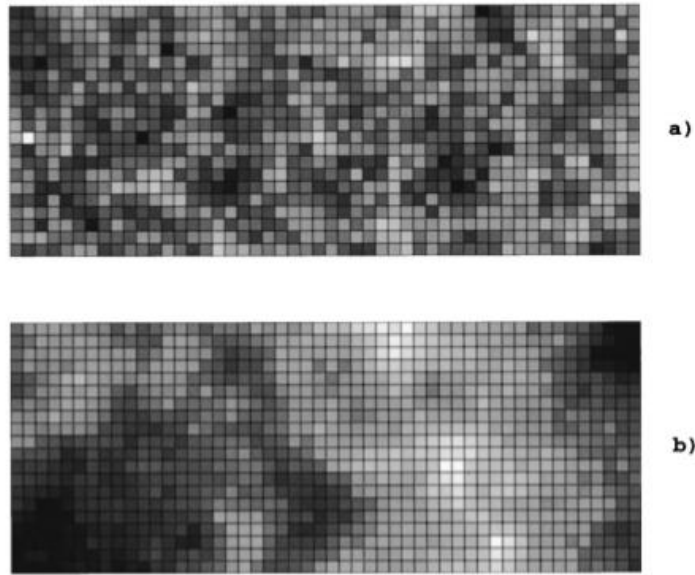
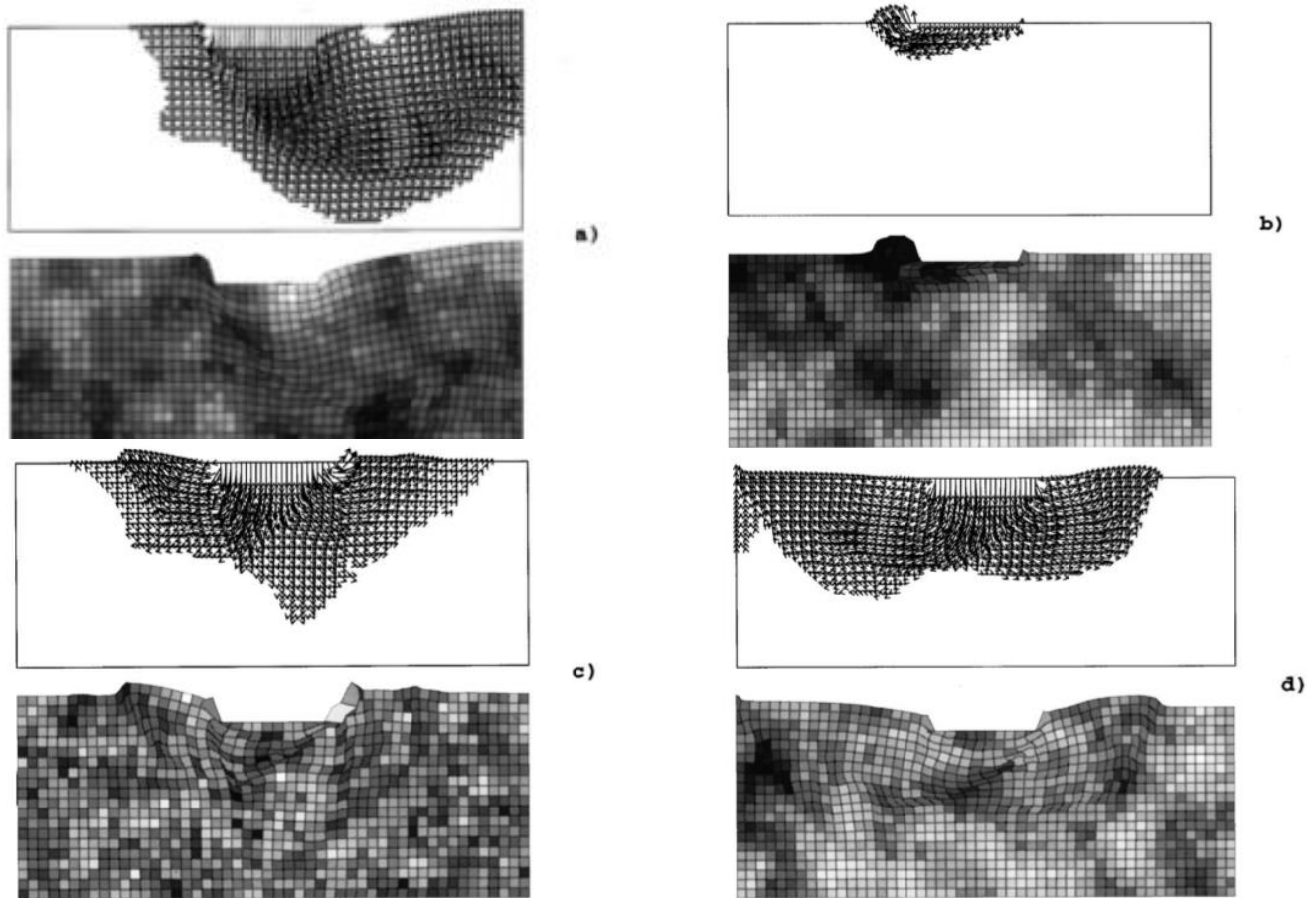


Ilustración 11. Campos de suelo aleatorio. (Tomado de: *Bearing capacity of rough rigid strip footing on cohesive GRIFFITHS 2002*).



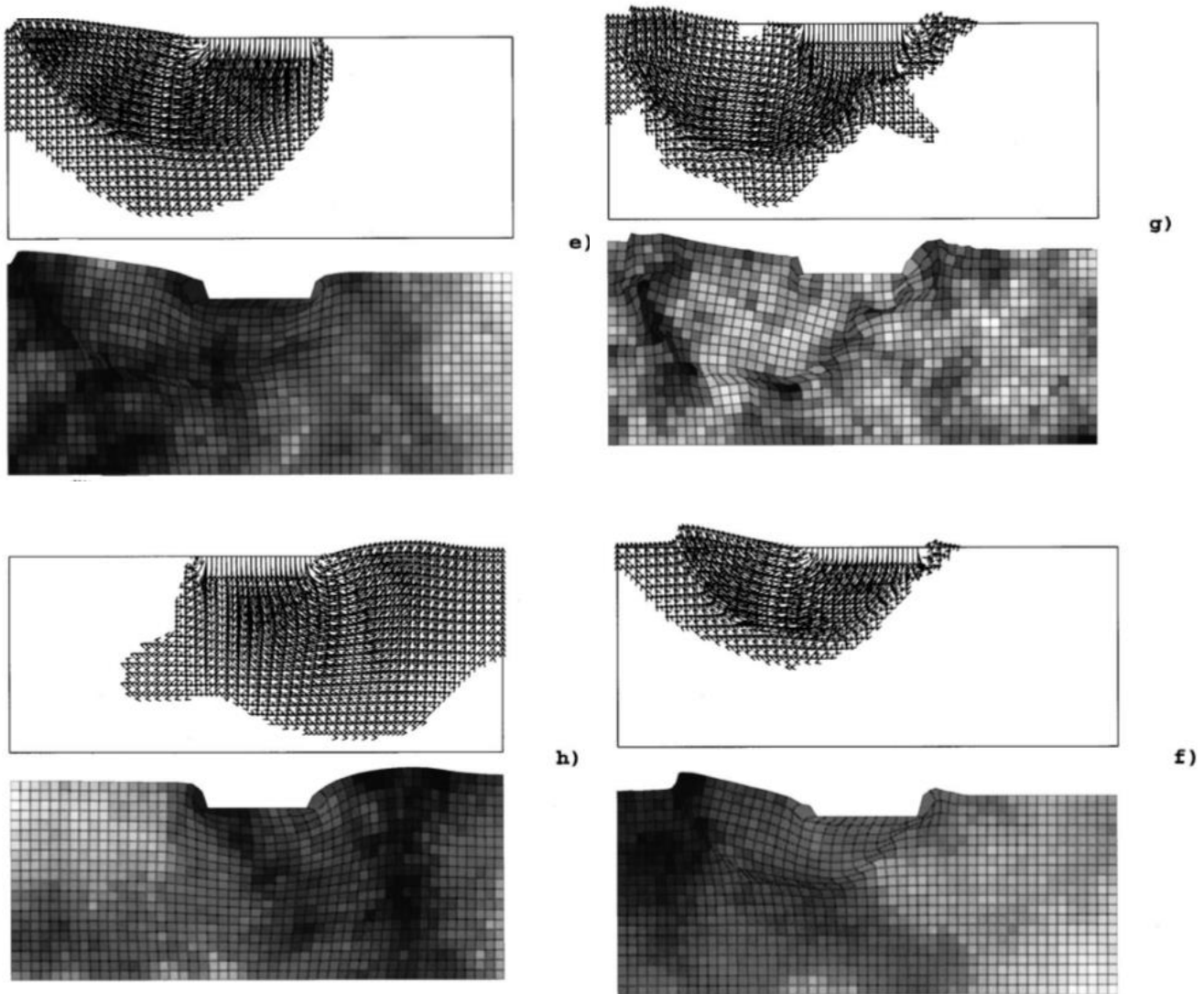


Ilustración 12. Mallas deformadas típicas y el gráfico de desplazamiento correspondiente para algunas relaciones. (Tomado de: *Bearing capacity of rough rigid strip footing on cohesive GRIFFITHS 2002*).

Este estudio probabilístico sobre la capacidad de soporte de una base rígida y rugosa en un suelo heterogéneo llegó a la conclusión que la capacidad media de un pie en un suelo con una resistencia al corte variable es siempre menor que una capacidad determinante basada en el valor medio, pues los elementos débiles debajo de la base se unen, y estos elementos débiles tienden a dominar la capacidad de soporte de una base en un suelo espacial aleatorio.

4.4 EFECTOS DE LA HETEROGENEIDAD ALEATORIA DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO SOBRE LA CAPACIDAD DE CARGA. RADU POPESCU.

Este fue un estudio de la heterogeneidad aleatoria de las propiedades del suelo frente a la capacidad de carga del mismo, la fuerza cortante tiene dos incertidumbres que son la variabilidad espacial inherente y la incertidumbre en la estimación de su valor esperado.

La base de este estudio es una simulación de monte carlo en combinación de análisis de elementos finitos no lineales, los asentamientos diferenciales se calculan en el análisis estocástico, con el uso de curvas de fragilidad se investigan los efectos de varios parámetros probabilísticos del problema.

Los resultados arrojaron que los dos parámetros más importantes son el coeficiente de variación y la distribución de probabilidad marginal de la resistencia al corte del suelo.

El estudio se basó en un modelo de una base rígida superficial colocada al nivel del suelo sobre una arcilla sobre consolidada, se estudiaron los asentamientos y la capacidad de carga de la base.

Popescu observó que la resistencia del suelo en capas poco profundas está sesgado positivamente, mientras que los más profundos tienden a seguir distribuciones más simétricas.

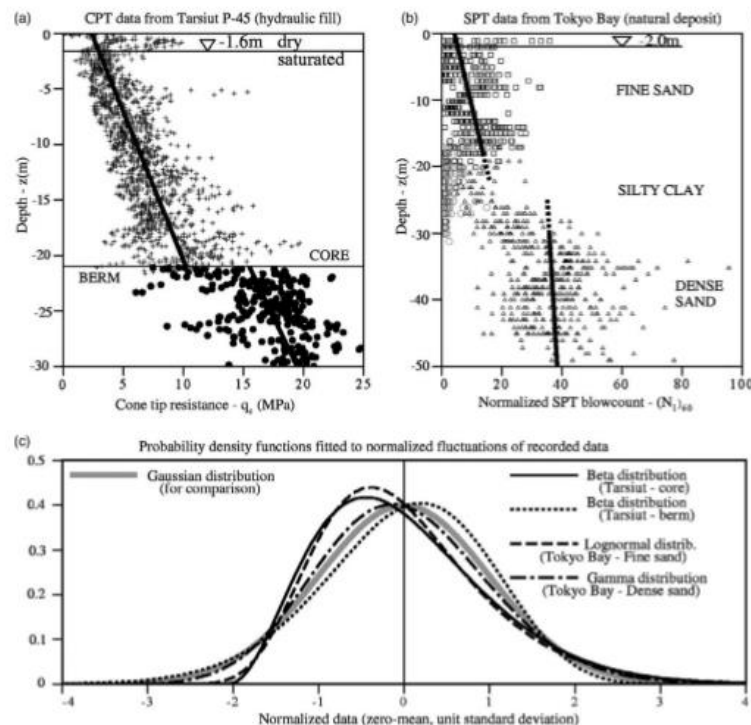


Ilustración 13. Resultados de las pruebas de penetración in situ. (Tomado de: *Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity* POPESCU 2005).

La anterior imagen (ilustración 13) muestra los resultados de las pruebas de penetración in situ y su correspondiente probabilidad ajustadas para los datos normalizados.

- a) Es la resistencia a la penetración del cono de 8 perfiles CPT de una playa artificial.
- b) Datos normalizados de penetración estándar de 24 perforaciones de un sitio de la Bahía de Tokio, donde hay un depósito natural del suelo.

Las líneas rectas en a y b representan los valores promedio.

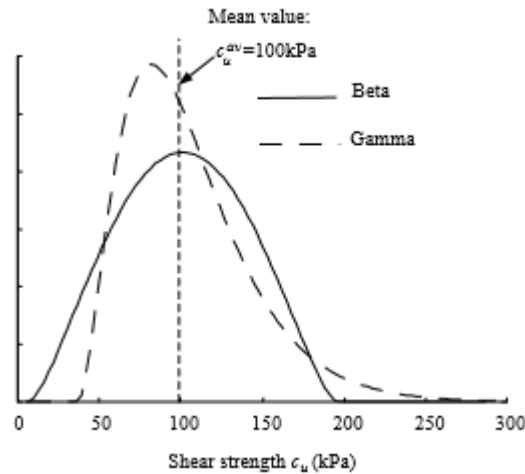


Ilustración 14. Modelos normalizados Beta y Gamma. (Tomado de: *Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity POPESCU 2005*).

La anterior imagen representa los modelos normalizados Beta y Gamma (ilustración 14), que fueron seleccionados para la resistencia al corte no drenado, el valor C_u para ambos modelos es de 100KPa, el coeficiente de variación es del 40 %.

A continuación que complementa el uso del método de simulación de monte carlo, con análisis de elementos finitos (ilustración 15), utilizando como entrada los valores de resistencia del suelo en cada ubicación espacial.

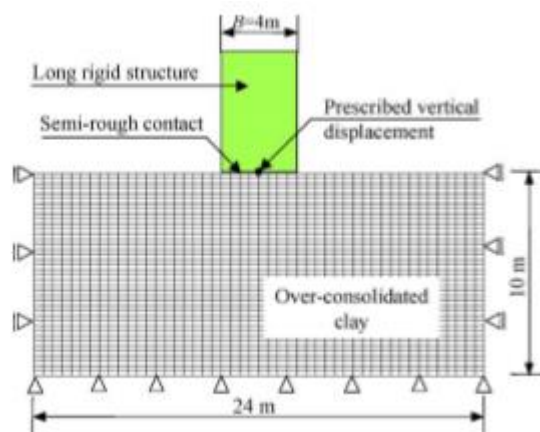


Ilustración 15. Malla de elementos finitos. (Tomado de: *Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity POPESCU 2005*).

Condiciones de contorno de la malla.

Al aumentar la presión vertical, la base de asienta sin rotaciones e induce a la capacidad de carga de un patrón simétrico (ilustración 16). Este patrón se observa en la figura a.

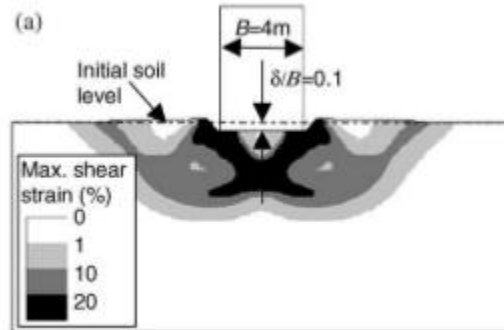


Ilustración 16. Mecanismo de falla. (Tomado de: *Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity POPESCU 2005*).

La curva de resolución de presión correspondiente se muestra con una línea de puntos en la figura d. La figura b muestra la fuerza de cizalladura del suelo variable espacialmente. (Ilustración 17) Las áreas más claras identifican las zonas más fuertes, mientras que las áreas más oscuras son las zonas más débiles. Se desarrolla una superficie de falla asimétrica, que pasa principalmente a través de las zonas de suelo más débil. Gracias a esto también se puede predecir la rotación de la base rígida.

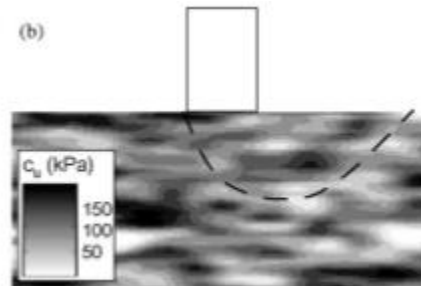


Ilustración 17. Fuerza de cizalladura del suelo. (Tomado de: *Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity POPESCU 2005*).

La figura c muestra los resultados para la tensión de cizallamiento máxima (ilustración 8) correspondiente al depósito de suelo variable de la figura b.

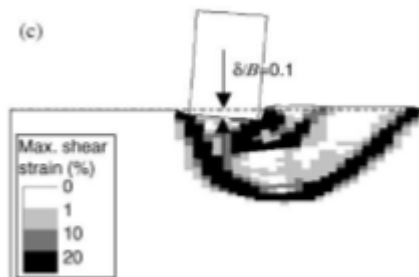


Ilustración 18. Fuerza de cizalladura máxima. (Tomado de: *Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity POPESCU 2005*).

Una de las conclusiones más importantes es la demostración de que la variabilidad espacial inherente de la resistencia al cizallamiento del suelo puede modificar drásticamente la forma básica del mecanismo de falla.

Otra conclusión es que las superficies de falla generalmente tienden a pasar a través de zonas de suelo más débiles. Los mecanismos de falla tienen cambios significativos sobre la capacidad de soporte final.

5. MODELO

5.1 CENTRIFUGA GEOTECNICA.

La idea de realizar un prototipo (ilustración 19) es que en este se produzcan las mismas tensiones que en el modelo a escala, y esto se logra colocando el modelo en una centrifuga que aplica una mayor aceleración gravitacional al prototipo. Existen relaciones (ilustración 20) entre el modelo y el prototipo y son establecidas por las leyes de escalamiento, a continuación se presenta una tabla donde se evidencian todas las relaciones.

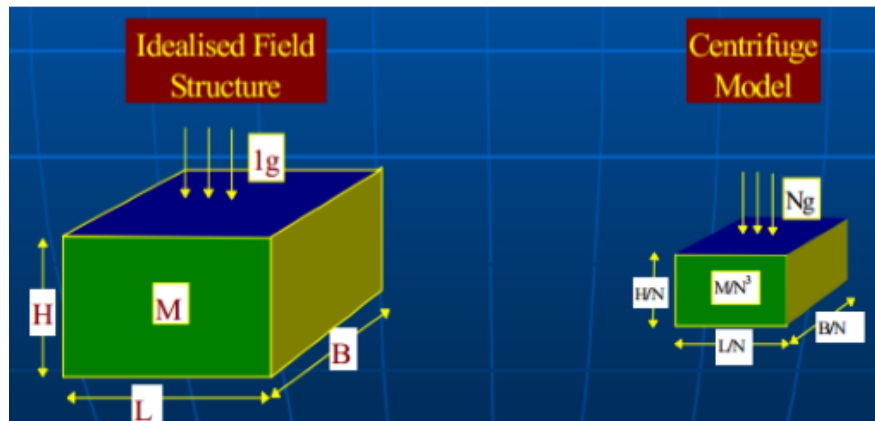


Ilustración 19. Relación del modelo y el prototipo. (Tomado de: Mecánica de suelos aplicada – MSUA – Cimentaciones superficiales, MS.c. Lina Ximena Garzón Avila.)

Parameter	Scaling factor	Parameter	Scaling factor
Linear dimension	1/n	Gravity	n
Area dimension	1/n ²	Force	1/n ²
Volume dimension	1/n ³	Time	1/n ²
Stress	1	Mass	1/n ³
Strain	1	Unit weight	n
Density	1	Velocity	n

Ilustración 20. Parámetros y sus relaciones del modelo y prototipo. (Tomado de: Mecánica de suelos aplicada – MSUA – Cimentaciones superficiales, MS.c. Lina Ximena Garzón Avila.)

El uso de la centrifuga geotécnica consiste en construir un modelo a escala e introducirlo en la centrifuga, y así crear la simulación artificial de algunos procesos geotécnicos como consolidación, deformaciones, fallas, entre otros; la ventaja es que se crean en tiempos muy cortos.

Así esto se convierte de gran ayuda para la ingeniería geotécnica para entonces estudiar, analizar y diseñar problemas reales. El concepto del modelamiento en centrifuga es que cuando gira genera un campo gravitacional, sometiendo a aceleraciones típicas de 30 y 100g.

Las aplicaciones típicas son los ensayos de fundaciones superficiales (este caso) y profundas, estabilidad de taludes, terraplenes, estabilidad de túneles, estructuras de contención entre otras. La centrifuga usada para realizar el estudio es la minicentrifuga geotécnica de los Andes, a continuación se presentan las dimensiones de la misma (tabla 1).

DIMENSIONES	L (CM)
Distancia eje-plataforma	56,5
Longitud del rotor	150
Diámetro sala de centrifugación	170
Longitud plataforma del modelo	70
Largo Plataforma	17,5
Altura Libre	13,5
RENDIMIENTO	VALORES
Máxima masa del modelo	4000g
Aceleración máxima (4000g)	400G
Potencia nominal	3HP

Tabla 1. Características de centrifuga geotécnica. Fuente: Garzón (2010).

La prueba de la centrifuga se llevó a cabo en aproximadamente tres minutos.

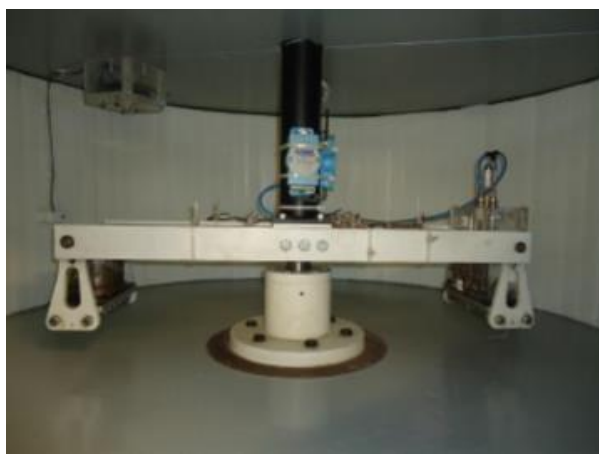


Ilustración 21. Imagen de la centrifuga de los Andes. (Tomado de: Mecánica de suelos aplicada – MSUA – Cimentaciones superficiales, MS.c. Lina Ximena Garzón Avila.)



Ilustración 22. Centrifuga geotécnica. (Tomado de: Mecánica de suelos aplicada – MSUA – Cimentaciones superficiales, MS.c. Lina Ximena Garzón Avila.).

5.2 PROTOTIPO.

En la tesis de la ingeniera Lina se realizaron treinta ensayos de capacidad portante con modelos a escala reducida en la centrifuga geotécnica, los treinta modelos están formados por diferentes combinaciones de caolín y bentonita y se aseguró un valor teórico de límite líquido. Y así garantizar la generación de campos aleatorios que simulan los suelos heterogéneos. Los treinta ensayos se dividieron en 3 grupos de 10 modelos, manejando una media, desviación estándar constante y varia la distancia de correlación vertical. Esta distancia es de 1.5, 6 y 15m.

Estos ensayos se realizaron siguiendo las recomendaciones por Grabowska y Olszewska (2003); Karunarante (2001) y Misra (1996) los cuales con base en diferentes proporciones de caolín y bentonita determinaron el comportamiento de la propiedad de límite líquido. Se usó como método la técnica de descomposición matricial la cual permite generar campos bidimensionales de un parámetro introduciendo su media, desviación estándar y la distancia de correlación, método desarrollado por El-Kadi y Williams (2000).

Los modelos fueron sometidos a una carga superficial la cual fue controlada, es decir que cada modelo se sometió a una carga hasta llegar a la falla, a continuación se presenta la imagen de uno de los modelos (ilustración 21).

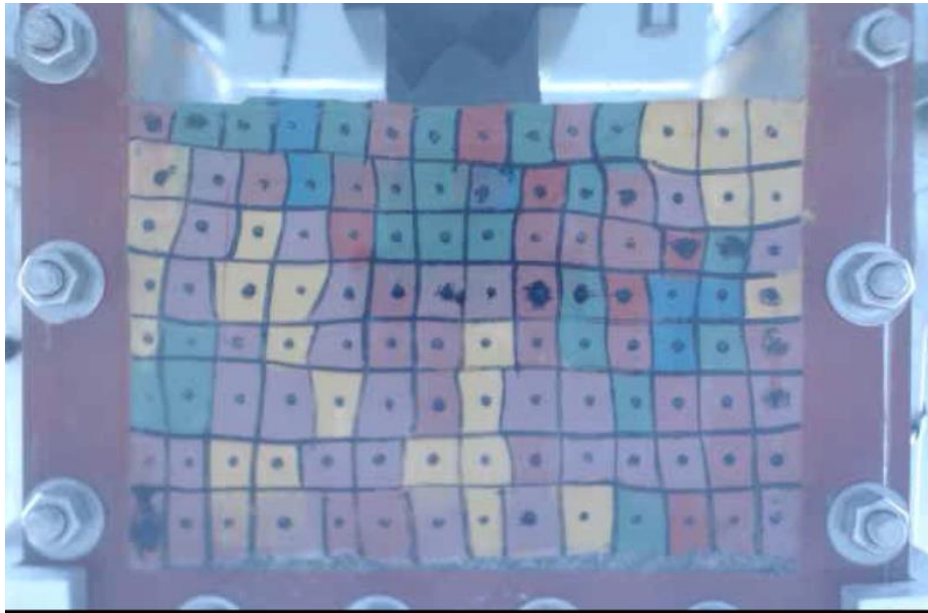


Ilustración 23. Modelo realizado por la Ing. Lina. long 1.5-1 (Tomado por: MS.c. Lina Ximena Garzón Avila).

6. PASOS ESTUDIO DE ANALISIS IMAGENES.

Se va a presentar el paso a paso tomando como ejemplo la carpeta de 6m y el ensayo 3 de esta.

- Se trabaja desde Matlab, Para analizar las imágenes se debe trabajar con PIVlab la cual es una carpeta para esto se da click en “browse for a folder” y se selecciona la carpeta PIVlab. (ilustracion 24).

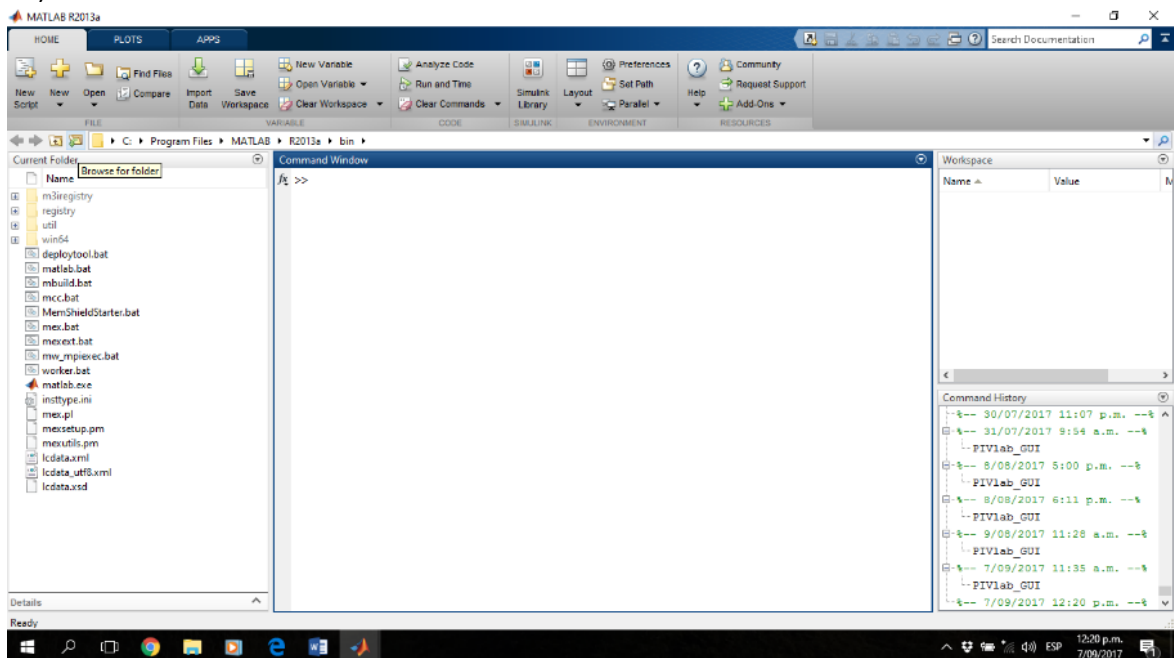


Ilustración 24. Paso 1.

- Se selecciona la carpeta con nombre PIVlab_GUI.m el cual tiene abre un programa alternativo para trabajar con imágenes. Y se corre (RUN) . (ilustración 25).

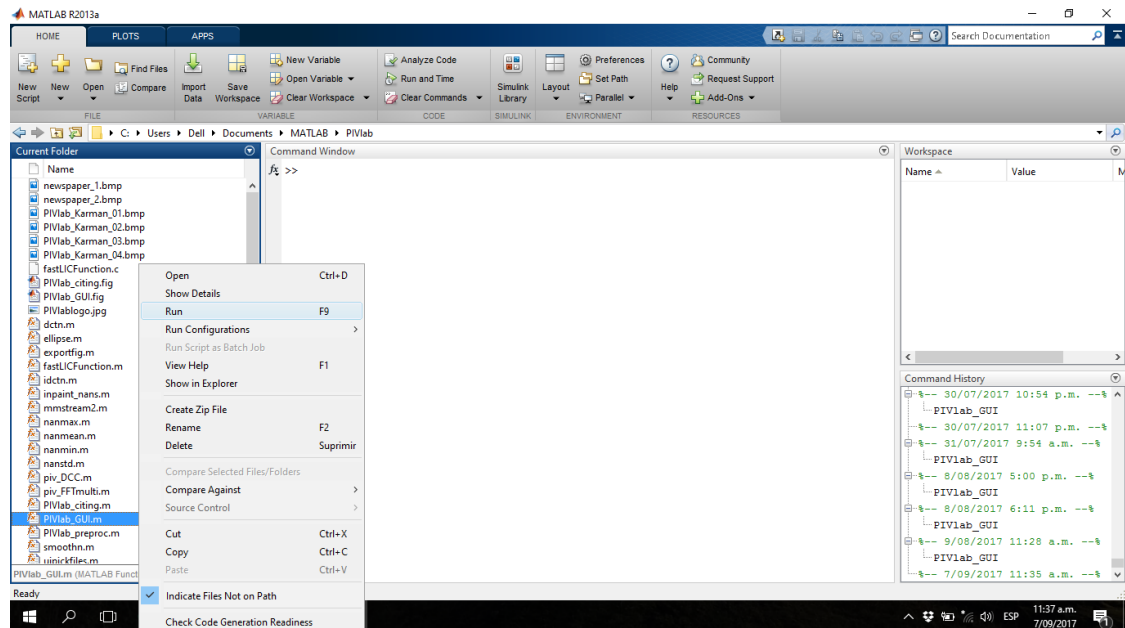


Ilustración 25. Paso 2.

- A continuación se abre una nueva ventana con el programa PIVlab. (ilustración 26)

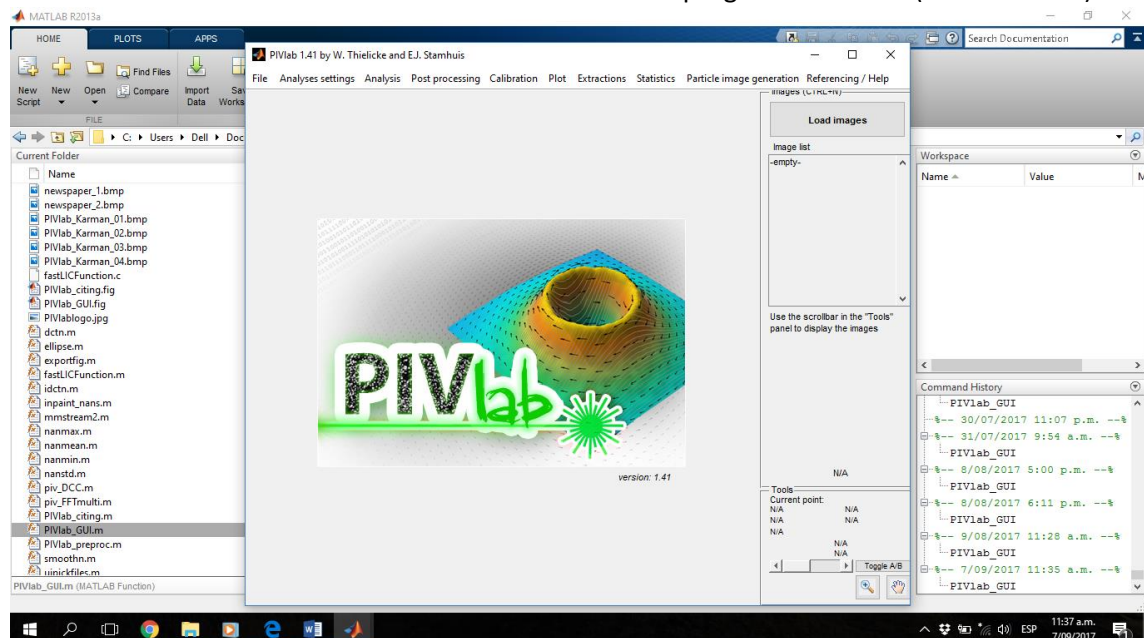


Ilustración 26. Paso 3.

- Aparecerá esta ventana y se procede a dar click en “Load Images” para subir las imágenes seleccionadas. Se selecciona la segunda opción del tipo de secuencia “Sequencing style 1-2,2-3,3+4,...”, para seleccionar el archivo en Current Directory se le da click en los puntos suspensivos, estos lo direccionan y así puede buscar donde tiene la carpeta con imágenes en su ordenador. Las selecciona y las agrega “add” y por último las importa “import”. (ilustración 27)

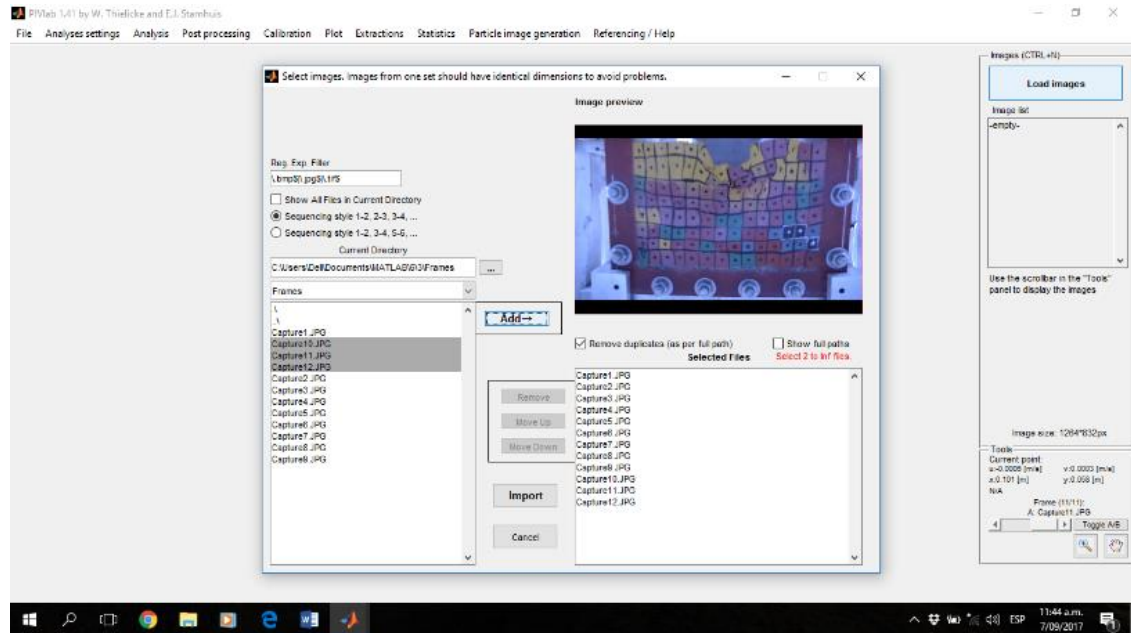


Ilustración 27. Paso 4.

- Aparecerán las imágenes cargadas, como se cargaron doce imágenes el programa genera una combinación de estas y arroja once, como primer paso se debe calibrar entonces se da click en “calibration-calibrate using current or external image”. Se da click en “Select reference distance”, se seleccionan los límites de izquierda a derecha en los que se encuentra el suelo en estudio. (Ilustración 28).

Después de seleccionar los límites en “Real distance (mm)” poner 140 y en “time step (ms)” poner 1000 finalmente se da click en “Apply calibration”.



Ilustración 28. Paso 5.

- Se da click en “Analyses settings - PIV settings” se selecciona “Pass 2 y Pass 3”. Esto hara que los vectores sean más especificadas. Se procede a dar click en “Analyses settings- Exclusion(ROI,Mask)” .(ilustración 29).



Ilustración 29. Paso 6.

- En la parte inferior derecha en la barra de movimiento se ubica en la última imagen que es la que presenta la mayor área en la pantalla, y se da click en “Select ROI” y se selecciona la cantidad de área en la que este el suelo (cuadro en línea punteada blanca). (Ilustración 30).



Ilustración 30. Paso 7.

- A continuación se deben crear mascarar estas tienen la función de que en donde estén no habrá vectores por lo cual se debe cubrir lo que no sea suelo, se da click en “draw a mask(s) for the current frame” y con clicks se selecciona la forma poligonal de la máscara finalizando en el punto inicial, dando click derecho terminara y da click en “create mask”. Cuando termine de crear las máscaras para cada capa, da click en “Analysis – Analyse!”. Aquí se le da la orden de que analice el movimiento en el área seleccionada con vectores. (ilustración 31).

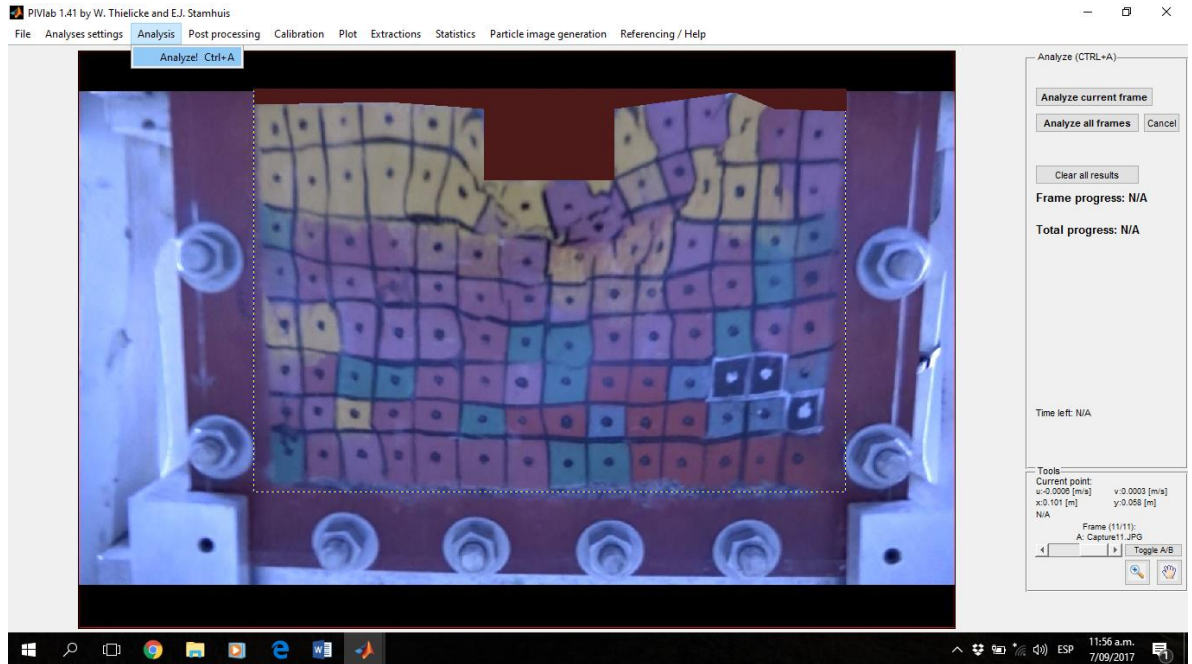


Ilustración 31. Paso 8.

- Aparecerá esto en la pantalla en “Frame progress” indica de 1 a 100% cuanto lleva analizado. Se observan vectores verdes y naranjas, los verdes son los reales, y los naranja son vectores creados por el programa por interpolación de los reales. Cuando finalice el análisis aparecerá cada una de las capas con los vectores de movimiento, se tienen que eliminar algunos que por cuestión de calidad de imagen, de luz se crearon incorrectamente. Por lo cual se da click en “Post procesing”. (Ilustración 32).



Ilustración 32. Paso 9.

- Se selecciona “Vector validation” el cual direcciona a la ventana que se ve a la derecha, desde la cual se pueden eliminar los vectores, se pueden eliminar grupalmente o individualmente. Para eliminarlos grupalmente se da click en “Select velocity limits”.a continuación aparece esta ventana, los puntos son vectores, en la cual se selecciona un área procurando que no sea pequeña, es decir que abarque la mayor cantidad de puntos menos los que estén más lejos, es importante que de la ventana de la derecha este seleccionado donde dice “interpolate missing data”. Para que el proceso anterior sea validado debe hacer click en “Apply to current frame”. (Ilustración 33).

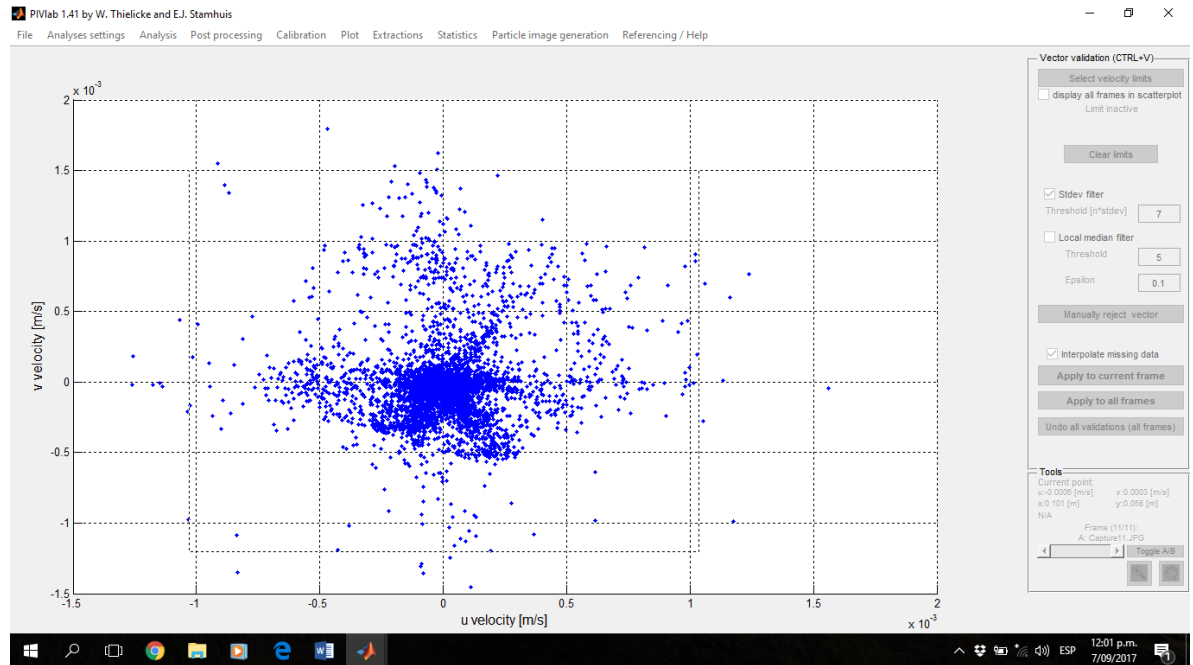


Ilustración 33. paso 10.

- Y así se verá después de aplicar el primer barrido de vectores. (Ilustración 34).



Ilustración 34. Paso 11.

- Para seleccionar los vectores manualmente dar click en “Manually reject vector”, y dar click sobre la cola de los vectores que quiere remover. Cuando ya tenga seleccionados los vectores da click derecho y después click en “Apply to the current frame”. (Ilustración 35).

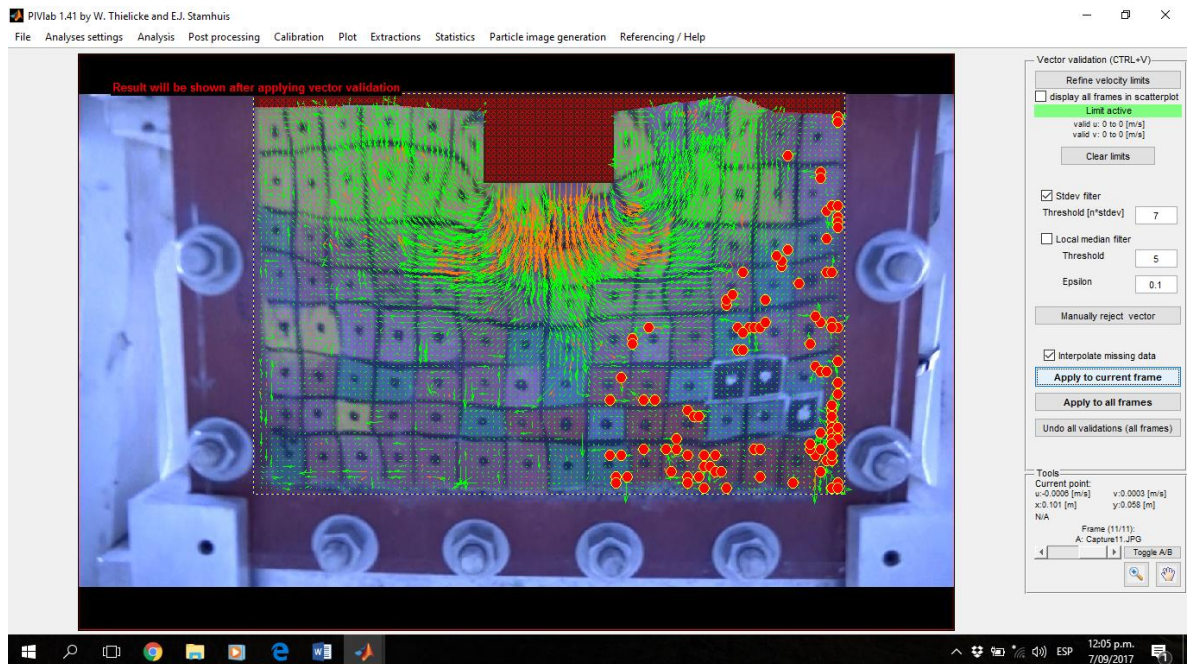


Ilustración 35. Paso 12

- Aparecerán los vectores eliminados con una x roja, si selecciono alguno y no se eliminó probablemente no puso el punto rojo en la cola.
 Cuando finalice de eliminar todos los vectores en cada capa da click en “File-Save-PIVlab sesión” así guarda el archivo debe seleccionar una carpeta en la que lo quiera guardar. (Ilustración 36).



Ilustración 36. Paso 13.

- Después de finalizar la eliminación de vectores en todas las capas procede a guardar el archivo dando click en “File-Save-MATfile” esto guardara los archivos en códigos de Matlab, que serán usados después con otro software para identificar el movimiento de la falla debe seleccionar una carpeta donde los quiera guardar. (Ilustración 37).

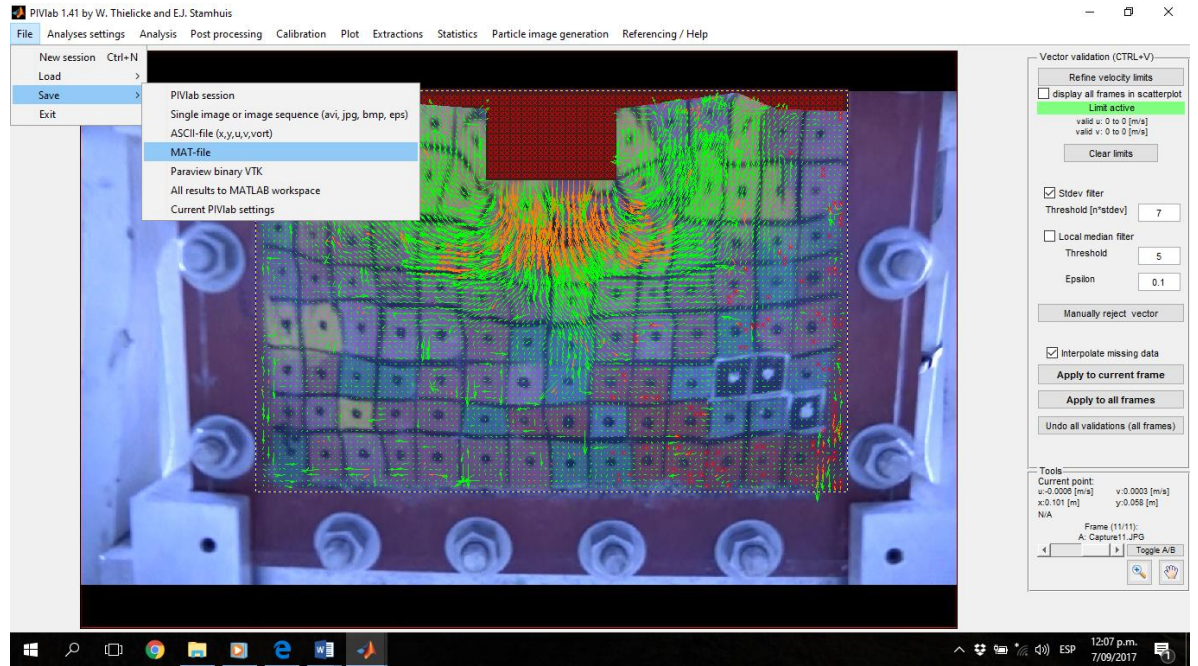
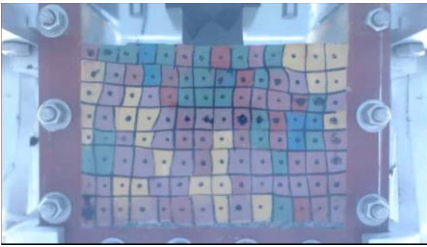

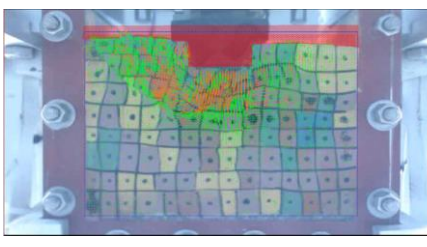
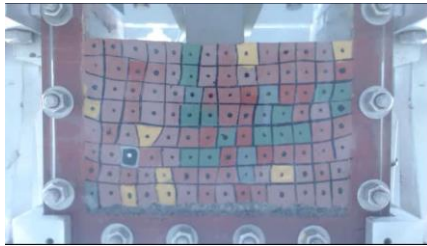
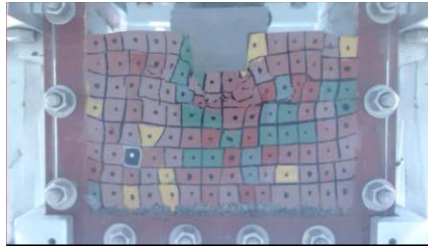
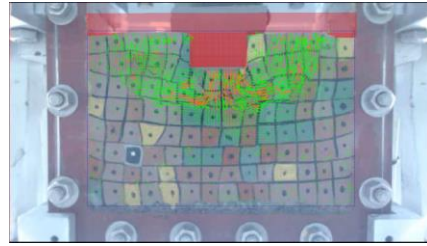
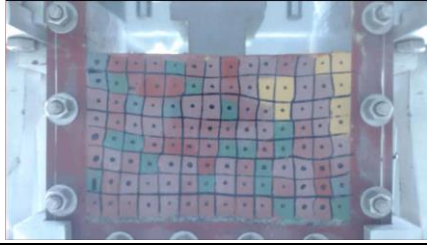



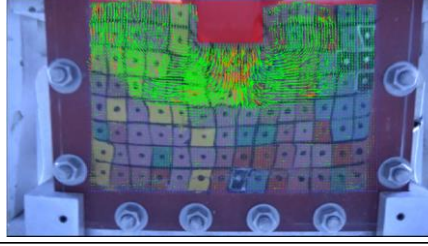
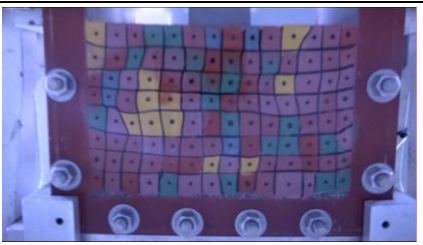
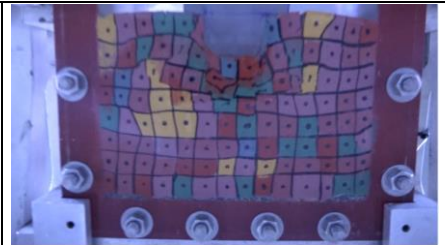
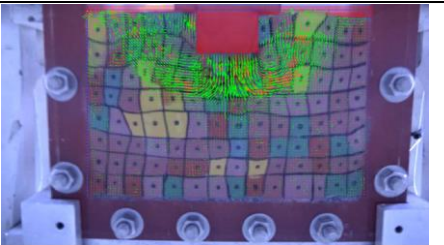
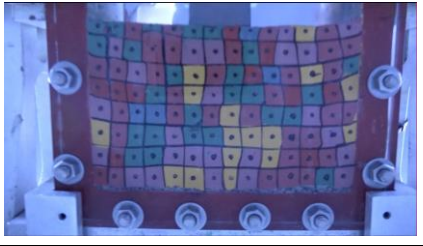

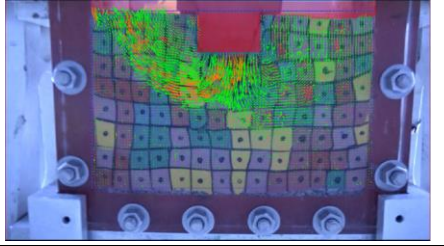


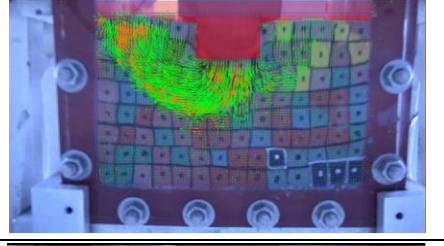


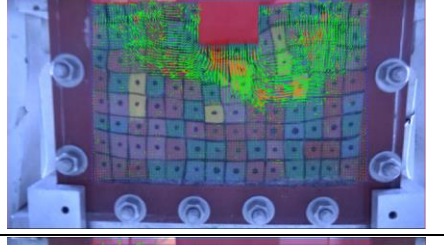
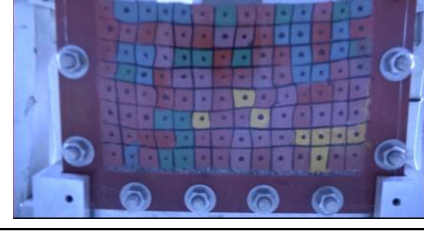
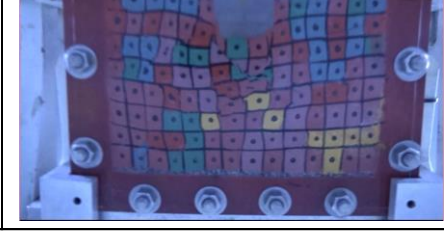
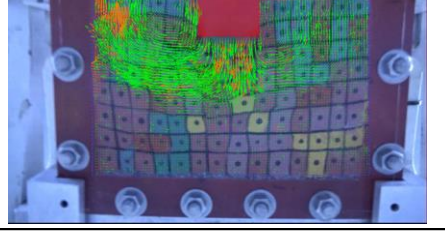
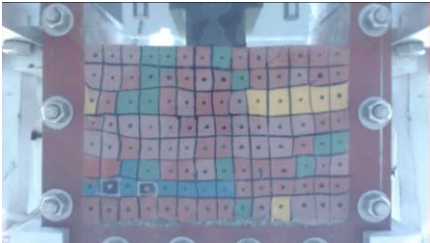

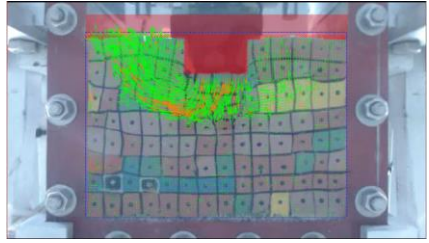


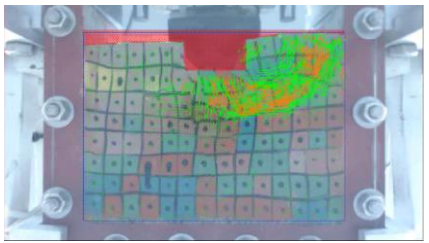
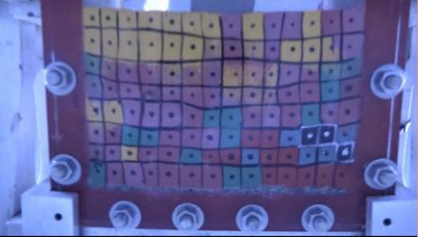

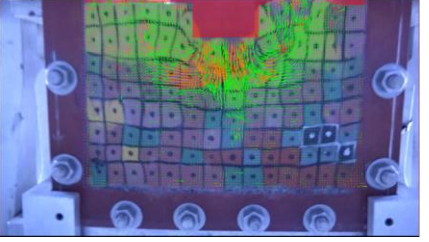


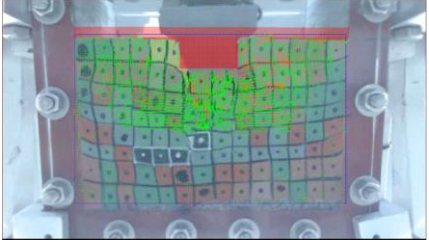
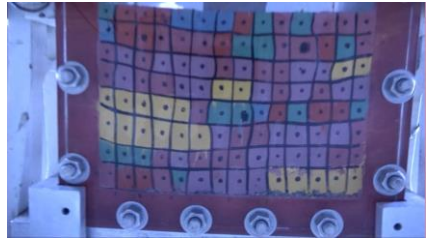

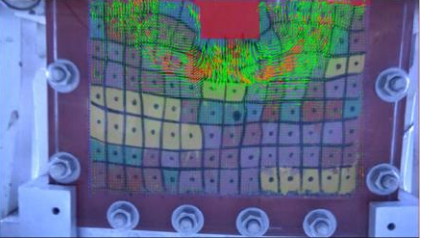


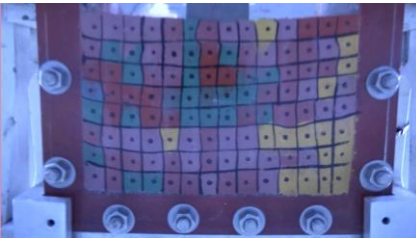
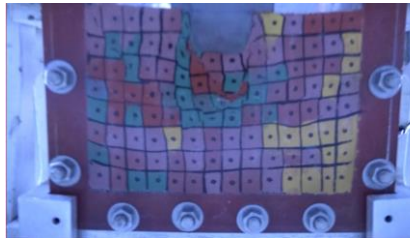
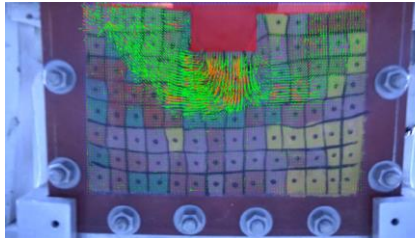


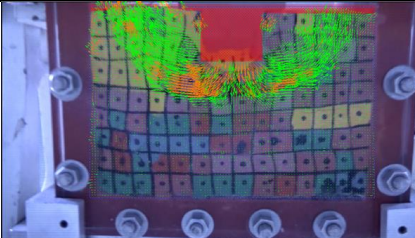


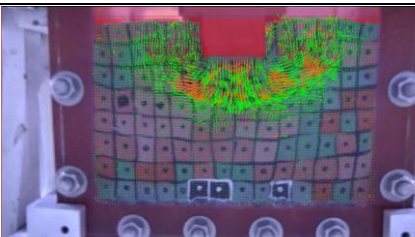
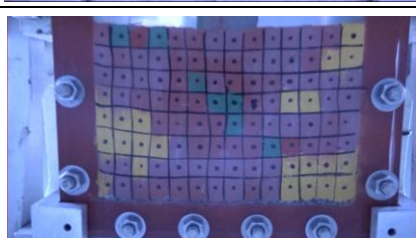

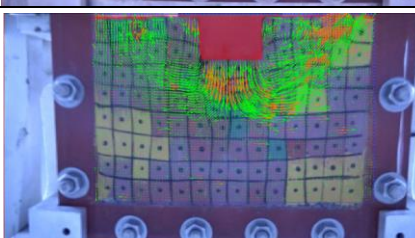
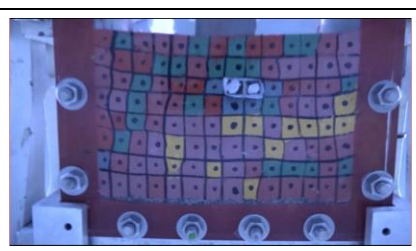

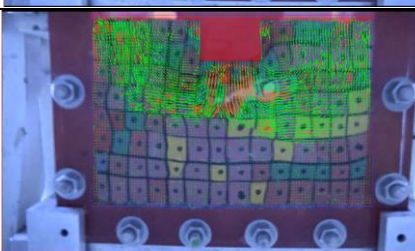
Ilustración 37. Paso 14.



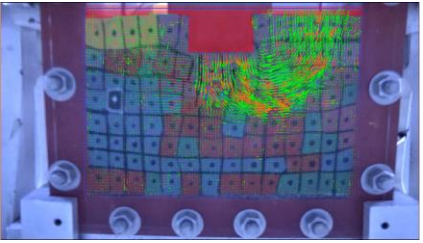
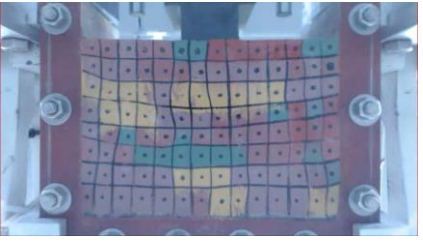

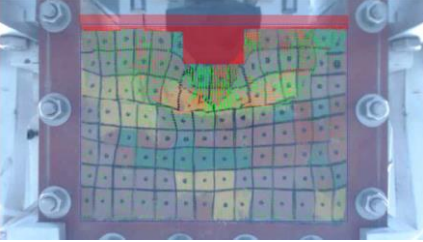
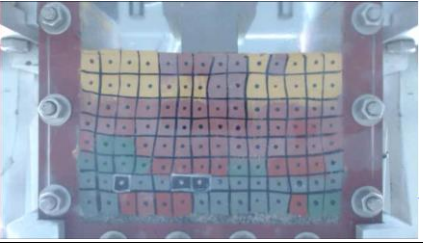

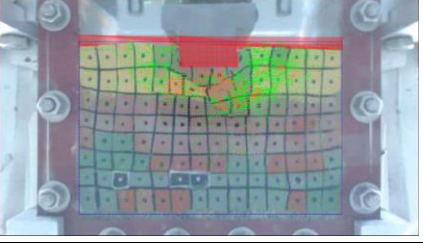


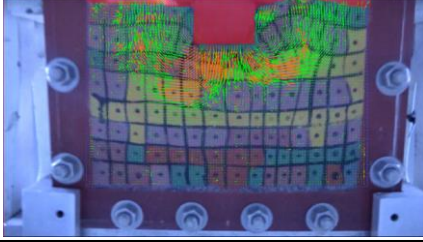
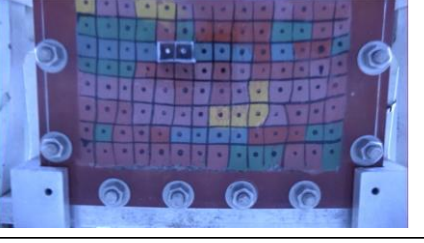

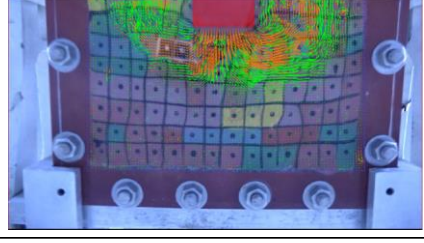
10. RESULTADOS OBTENIDOS.

1,5	FRAME INICIAL	FRAME FINAL (DESPUES DE LA FALLA)	FRAME FINAL CON VECTORES	OBSERVACIÓN
1				se presenta rotura hacia la izquierda.
2				se presenta una cuña notoria bajo la base rígida, una rotura hacia la derecha
3				se presenta una cuña notoria bajo la base rígida, una rotura hacia la derecha
4				se presenta una cuña notoria bajo la base rígida, se observa mayor movimiento hacia la izquierda.

5				se presenta un bulbo, hay movimiento en la izquierda y derecha, no hay rotura evidente.
6				se presenta una cuña bajo la base rigida, hay rotura evidente hacia el costado izquierdo.
7				se presente una cuña bajo la base rigida, presenta falla hacia la izquierda.
8				se presenta cuña que tiende a la derecha bajo la base rigida, tambien hay rotura hacia la derecha.
9				se presenta una cuña bajo la base rigida, hay movimiento del suelo en la parte interna izquierda.

6 m	frame inicial	frame final (despues de la falla)	observacion	
1				se presenta una cuña bajo la base rigida, hay una rotura en la parte izquierda.
2				hay gran movimiento del material desde la base rigida hacia la decha, la parte izquierda permanece sin movimiento.
3				hay gran movimiento en la parte superficial contigua a la base rigida, se presenta rotura hacia la derecha.
4				se presenta cuña bajo la base rigida, no se evidencia alguna rotura que llegue a la superficie, se presenta movimiento de material cercano a la base rigida.
5				aunque no se observa la superficie del suelo, se evidencia movimiento hacia la derecha.

6				<p>la mayoría del suelo permanece sin movimiento, se presenta una cuña bajo la base rígida. Se observa una rotura hacia el lado izquierdo.</p>
7				<p>no se observa con claridad la cuña, hay una rotura hacia el lado izquierdo</p>
8				<p>se presenta una cuña bajo a base rígida, movimiento a ambos costados de la base pero no llega a la superficie.</p>
9				<p>se presenta movimiento a ambos costados, predominando la rotura hacia la derecha.</p>
10				<p>hay gran movimiento cerca a la base rígida, no llega a la superficie.</p>

15 m	frame inicial	frame final (despues de la falla)	frame final con vectores	observacion
1				la mayor parte del suelo no presenta gran movimiento, esta la cuña bajo la base rigida, y una rotura hacia la izquierda que llega a la superficie.
2				se presenta un cuña bajo la base rigida, con una rotura hacia la derecha llegando a la superficie.
3				no se presenta gran movimiento, se observa la formacion de la cuña hacia la derecha
4				se presenta una gran deformacion superficial hacia la izquierda, un bulbo que sale de la esquina izquierda de la base rigida.
5				se presenta una cuña bajo la base rigida, y una rotura hacia la izquierda que llega a la superficie.

6				<p>se observa movimiento hacia ambos costados bajo la base rigida, solo el lado izquierdo atraviesa la superficie.</p>
7				<p>no se alcanza a observar la superficie, se presenta una cuña bajo la base rigida, y un bulbo hacia la izquierda.</p>
8				<p>se presenta un bulbo desde la esquina derecha de la base hacia la izquierda, llegando a la superficie.</p>
9				<p>no se presenta gran movimiento en la superficie, en la parte intera se formo un bulbo y movimiento cercano a este.</p>
10				<p>se presenta un leve desplazamiento superficial, bajo la base rigida se formo una cuña que tiende hacia la izquierda, bajo la superficie izquierda hay una cuña secundaria.</p>

11. CONCLUSIONES GENERALES.

- De la distancia de correlación de 1.5 m tres de los modelos fallaron hacia la derecha, cinco hacia la izquierda, y siete presentaron una cuña debajo de la base rígida, una no presenta mayor movimiento hacia ningún lado, ni bajo la base.
- De la distancia de correlación de 6 m cuatro de los modelos fallaron hacia la derecha, tres hacia la izquierda, y seis presentaron la cuña debajo de la base rígida, un modelo no presento gran movimiento, sus vectores fueron muy reducidos.
- De la distancia de correlación de 15 m, seis fallaron hacia la derecha, cinco modelos fallaron hacia la izquierda y dos modelos no presentaron grandes movimientos bajo la base rígida.
- Dado que son suelos heterogéneos no se puede predecir como fallaran, tienen propiedades y comportamientos diferentes, es por esto que en todas las distancias de correlación se presentan todos los tipos de falla.

12. BIBLIOGRAFIA.

- <file:///C:/Users/Dell/Downloads/411-826-1-SM.pdf>
- http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/tercer_ent/calculo_simplificado_capacidad_portante.pdf
- <http://www.cec.uchile.cl/~magsuelo/Lenart-Gonzalez.pdf>
- http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/tercer_ent/modelacion_fisica_centrifuga_problemas.pdf
- Akbas, S.O. and Kulhawy, F.H. (2010). Characterization and Estimation of Geotechnical Variability in Ankara Clay: A Case History. *Geotechnical Geological Engineering*, 28, 619–631.
- Al-Bittar, T. and Soubra A.H. (2012). Bearing capacity of strip footings on spatially random soils using sparse polynomial chaos expansion. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*.
- Almeida, M. and Parry, R. (1985). Small cone penetrometer tests and piezocone tests in laboratory consolidated clays. *Geotechnical Testing Journal*. ASCE. 8, (1), 14-24.
- Andersen, K.H., Jeanjean, P., Luger, D., Jostad, H.P. (2005). Centrifuge tests on installation of suction anchors in soft clay. *Ocean Engineering*, 32, 845–863.
- Asaoka, A. (1978). Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 18, (4).
- Chakraborty, P. and Popescu, R. (2012). Numerical simulation of centrifuge tests on homogeneous and heterogeneous soil models. *Computers and Geotechnics*, 41, 95–105.
- Chen, J-F. and Yu, S-B. (2011). Centrifugal and Numerical Modeling of a Reinforced Lime-Stabilized Soil Embankment on Soft Clay with Wick Drains. *International Journal of Geomechanics*, 11, (3), 167-173.

- Cho, S.E., and Park, H.C. (2010). Effect of spatial variability of cross-correlated soil properties on bearing capacity of strip footing. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34, 1–26.
- Der Kiureghian, A. and Ditlevsen, O. (2009). Aleatory or epistemic? Does it matter? *Structural Safety*, 31,(2), 105-112.
- El-Kadi, A.I. and Williams, S. A. (2000). Generating Two-Dimensional Fields of Autocorrelated, Normally Distributed Parameters by the Matrix Decomposition Technique. *Ground Water*, 38, (4), 523-532.
- El-Ramly, H., Morgenstern, N.R. and Cruden, D.M. (2003). Probabilistic stability analysis of a tailings dyke on presheared clay-shale. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 192-208.
- Fenton, G.A. and Griffiths, D.V. (2002). Probabilistic Foundation Settlement on a Spatially Random Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128, (5), 381-390.
- Fenton, G.A. and Griffiths, D.V. (2003). Bearing capacity prediction of spatially random $c-\phi$ soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, (1), 54-65.
- Griffiths, D.V. and Fenton, G.A. (2001). Bearing capacity of spatially random soil: the undrained clay Prandtl problem revisited. *Geotechnique*, 51, (4), 351-359.
- Griffiths, D.V. Fenton, G.A. and Manoharan, N. (2002). Bearing capacity of rough rigid strip footing on cohesive soil: Probabilistic study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128, (9), 743-755.
- Griffiths, D.V. Fenton, G.A. and Manoharan, N. (2006). Undrained Bearing Capacity of Two-Strip Footings on Spatially Random Soil. *International Journal of Geomechanics*, 6, (6), 421- 427.
- Griffiths, D.V., Huang, J. and Fenton, G.A. (2009). Influence of Spatial Variability on Slope Reliability Using 2-D Random Fields. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135, (10), 1367-1378.
- Haldar, S. and Babu, S. (2008). Effect of soil spatial variability on the response of laterally loaded pile in undrained clay. *Computers and Geotechnics*, 35, 537–547.
- Hicks, M.A. and Spencer, W.A. (2010). Influence of heterogeneity on the reliability and failure of a long 3D slope. *Computers and Geotechnics*, 37, 948–955.
- Hong, S. and Helin, F. (2011). Spatial Variability and Slope Reliability Analysis. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16, 1261-1276.
- Honjo, Y. and Otake, Y. (2013). A Simple Method to Assess the Effects of Soil Spatial Variability on the Performance of a Shallow Foundation. *Foundation Engineering in the Face of Uncertainty*, 385-404.
- Huber, M., Hicks, M.A., Vermeer, P.A. and Moormann, C. (2010). Probabilistic calculation of differential settlement due to tunneling. *Proceedings of the 8th International Probabilistic Workshop*, 1-13.
- Imai, G., 1979, Development of a New Consolidation Test Procedure Using Seepage Force. *Soils and Foundations*, 19, (3), 45–60.
- Jaksa, M.B., Kaggwa, W.S. and Brooker, P.I. (1999). Experimental evaluation of the scale of fluctuation of a stiff clay. 8th International Conference on Application of Statistics and Probability, Rotterdam, Netherlands, 415–422.
- Jones, A.L., Kramer. S.L. and Arduino, P. (2002). Estimation of uncertainty in geotechnical properties for performance-based earthquake engineering, PEER report 2002/16.

- Kasama, K. and Zen, K. (2011). Effects of Spatial Variability of Soil Property on Slope Stability. *Vulnerability, uncertainty, and risk analysis, modeling and management*. ASCE, 691 – 698.
- Kimura, T., Kusakabe, O., Takemura, J. and Saitoh, K. (1984). Preparation of Normally Consolidated Clay Stratum in a Centrifuge. *Soils and Foundations*, 24, (4), 71-83.
- Lacasse, S. and Nadim, F. (1996). Uncertainties in characterizing soil properties. *Uncertainty in the Geologic Environment, From Theory to Practice, Proceeding of Uncertainty 96*. Geotechnical Special Publication No. 58. 49-75.
- Lumb, P. (1966). The Variability of Natural Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 3, (2), 74-97.
- Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá. (1997). Convenio Administrativo 01-93. INGEOMINAS, UPES and DNPAD.
- Mitchell, R. J. (1998). The eleventh annual R. M. Hardy keynote address, 1997: Centrifugation in geoenvironmental practice and education. *Canadian Geotechnical Journal*, 35, (4), 630-640.
- Onyejekwe, S. and Ge, L. (2013). Scale of Fluctuation of Geotechnical Parameters Estimated from CPTu and Laboratory Test Data. *Foundation Engineering in the Face of Uncertainty*, 434-443.
- Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H. (1999a). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 612-624.
- Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H. (1999b). Evaluation of geotechnical property variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 625–639.
- Popescu. R., Deodatis. G. and Nobahar. A. (2005). Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 20, 324–341.
- Rajesh, S. and Viswanadham, B.V.S. (2012). Centrifuge and Numerical Study on the Behavior of Clay-Based Landfill Covers Subjected to Differential Settlements. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 16 (4), 284-297.
- Randolph, M.F. and House, A.R. (2001). The complementary roles of physical and computational modelling. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics I*, 1-8.
- Robinson, R. G., Tan, T. S., and Lee, F. H. (2003). A comparative study of suction-induced seepage consolidation versus centrifuge consolidation. *Geotechnical Testing Journal*, 26, (1) 1-10.
- Schofield, A.N. (1980). Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations. *Geotechnique*, 30, (3), 227-268.
- Schofield, A., 1995, *Geotechnical Centrifuge Technology*, R. N. Taylor, Ed., Blackie Academic and Professional, Glasgow.
- Soubra, A.H., Youssef Abdel Massih D.S. and Kalfa, M. (2008). Bearing capacity of foundations resting on a spatially random soil. *GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation*, ASCE, GSP 178, 66–73.
- Stuedlein, A.W., Kramer, S.L., Arduino, A. and Holtz, R.D. (2012). Geotechnical Characterization and Random Field Modeling of Desiccated Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138, (11), 1301-1313.
- Taylor, R. N. (1995). *Geotechnical Centrifuge Technology*, Ed., Blackie Academic and Professional, Glasgow.

- Uzielli, M., Vannucchi, G., and Phoon, K.K. (2005). Normal field characterization of stress-normalised cone penetration testing parameters. *Geotechnique*, 55, (1), 3-20.
- Vanmarcke, E.H. (1977). Probabilistic modeling of soil profiles. *Journal Geotechnical Engineering Division*. ASCE, 103, 1227-1246.
- Vanmarcke, E.H. (1983). Random fields: analysis and synthesis. MIT Press, Cambridge.
- Yang, K-H., Kniss, K.T., Zornberg, J.G. and Wright, S.G. (2008). Finite Element Analyses for Centrifuge Modelling of Narrow MSE Walls. The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition, Cancun, Mexico.
- Zelikson, A. (1969). Geotechnical models using the hydraulic gradient similarity method. *Geotechnique*, 19, (4), 495-508.
- Zhang, Y., Cassidy, M.J. and Bienen, B. (2013). Development of a combined VHM loading apparatus for a geotechnical drum centrifuge. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 13, (1), 13–30.