

Modelación numérica del ensayo de capacidad de carga de una cimentación superficial apoyada sobre un suelo fino con variabilidad espacial de sus propiedades (límite líquido)

John Alexander Rodríguez Paramo
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá, Colombia,
john.rodriguez-p@mail.escuelaing.edu.co

Lina Ximena Garzón Ávila
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá, Colombia,
lina.garzon@escuelaing.edu.co

ABSTRACT

The present research proposes a methodology for numerically modeling the load-bearing capacity of a shallow foundation supported on a fine-grained soil exhibiting spatial variability in its physic and mechanical properties. This modeling is carried out using Plaxis 2D software, and the obtained results were compared with those found by Garzón (2019) in his doctoral thesis titled "Physical modeling of soil spatial variability: application to shallow foundation."

In total, 51 numerical models were developed, including one homogeneous model and 50 heterogeneous models. The heterogeneous models were structured in six different configurations. The first three configurations had a liquid limit of 157%, a coefficient of variation of 30%, and horizontal correlation distances of 1.5m, 6.0m, and 15.0m. The next three configurations were developed with a liquid limit of 157%, a horizontal correlation distance of 1.5m, and coefficients of variation of 13%, 30%, and 51%, respectively.

The numerical models were calibrated by recreating in Plaxis 2D the 55 physical centrifuge modeling's created by Garzón (2019). In these modelings, the liquid limit property of fine-grained soils was spatially varied. Additionally, the ideal way of incorporating geotechnical parameters into the software was evaluated, the creation and configuration of the analysis environment were determined, boundary conditions were established, the type of analysis model to be used was selected, and the stepwise assembly sequences were defined.

Finally, the results of the numerical modelings were compared with the findings obtained by Garzón (2019) in the physical modelings.

Keywords: numerical modeling, load capacity, finite elements, spatial variability, shallow foundation, horizontal correlation distance, coefficient of variation.

RESUMEN

La presente investigación plantea una metodología para modelar numéricamente la capacidad de carga de una cimentación superficial apoyada sobre un suelo fino que presenta variabilidad espacial en sus propiedades físico-mecánicas. Esta modelación se realiza a través del Software Plaxis 2D y los resultados obtenidos se compararon con los encontrados por (Garzón, 2019) en su trabajo de tesis doctoral titulado "Physical modeling of soil spatial variability: application to shallow foundation".

En total se realizaron 51 modelos numéricos. Estos incluyeron un modelo homogéneo y 50 modelos heterogéneos. Los modelos heterogéneos se estructuraron en seis configuraciones distintas. Las primeras tres configuraciones presentaron un límite líquido del 157%, un coeficiente de variación del 30%, y distancias de correlación horizontal de 1.5m, 6.0m y 15.0m. Las siguientes tres configuraciones se desarrollaron con un límite líquido del 157%, una distancia de correlación horizontal de 1.5m, y coeficientes de variación del 13%, 30%, y 51%, respectivamente.

Los modelos numéricos se calibraron por medio de la recreación en Plaxis 2D de las 55 modelaciones físicas en centrifuga geotécnica creados por (Garzón, 2019). En estas modelaciones, se varió espacialmente la propiedad de límite líquido de los suelos finos. Adicionalmente, se evaluó la manera idónea de la incorporación de parámetros geotécnicos al software, la creación y configuración del entorno de análisis, se determinaron las condiciones de frontera, tipo de modelo de análisis a emplear y las secuencias del montaje por etapas

Finalmente, los resultados de las modelaciones numéricas se compararon con los hallazgos encontrados por (Garzón, 2019) en las modelaciones físicas.

Palabras claves: modelación numérica, capacidad de carga, elementos finitos, variabilidad espacial, cimentación superficial, distancia de correlación horizontal y coeficiente de variación.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la incidencia que tiene la variabilidad espacial en las propiedades físico-mecánicas del suelo es de gran importancia, debido a que esta es una de las mayores fuentes de incertidumbre en geotecnia (Duncan & Member, 2000). La variabilidad espacial influye de manera directa y significativa en el comportamiento estructural de las edificaciones ya que puede inducir la presencia de asentamientos diferenciales, debido a que la capacidad de carga, el mecanismo de falla y las deformaciones de una masa de suelo con variabilidad espacial difieren a la de un suelo homogéneo (Bauduin, 2003; Fenton & Griffiths, 2002; Gómez et al., 2021; Soubra et al., 2008).

En la actualidad los métodos de diseño de cimentaciones en su mayoría se realizan con metodologías deterministas, las cuales, generan grandes incertidumbres, debido al uso de propiedades nominales del suelo,

las cuales, parten de parámetros físicos y mecánicos determinados a partir de ensayos de laboratorio (Simões et al., 2020). Estos ensayos son efectuados sobre muestras provenientes de perforaciones realizadas en la masa de suelo objeto de estudio, sin embargo, estas perforaciones representan un diminuto punto en el espacio muestral.

Con esta información se alimenta los modelos numéricos que conducirán a determinar la capacidad de carga de los suelos (James & Wells, 2018). Debido a lo anterior, se asume que el suelo es un material continuo, homogéneo, isotrópico, lineal y elástico para efectos de diseño, lo cual, es incorrecto debido a que en los suelos presentan variabilidad espacial en sus propiedades debida a la naturaleza intrínseca de estos materiales y a los métodos de obtención de sus parámetros (Yamin, 2016).

Pese a los importantes hallazgos encontrados en torno a la variabilidad

espacial de las propiedades del suelo y la influencia que tiene en la iteración suelo – estructura, estos hallazgos aún no se implementan de forma eficiente en la metodología de diseño aplicados en nuestro país. En el cual, predominan los diseños determinísticos regidos por el cálculo de factores de seguridad y poco se contempla la ejecución de diseños probabilísticos en donde se consideran la distribución de probabilidad de las propiedades del suelo (Gómez et al., 2021).

La modelación física y numérica son herramientas consolidadas que permiten el estudio de casos complejos en geotecnia (Bhattacharya et al., 2021). Autores como (Soubra et al., 2008) mediante simulaciones numéricas y análisis estadísticos encontraron que la capacidad de carga de una cimentación superficial apoyada en un suelo heterogéneo es menor que la determinada para un suelo homogéneo. Adicionalmente, encontraron que, la variabilidad espacial inherente de los parámetros de resistencia al corte de un suelo puede modificar drásticamente el mecanismo de falla de este.

Otros autores como (Chakraborty & Popescu, 2012), simularon el proceso de licuefacción de suelos heterogéneos usando modelos físicos a escala reducida en centrifuga geotécnica, donde encontraron que bajo una misma densidad relativa los suelos heterogéneos presentan mayores presiones de poros que en suelos homogéneos.

La presente investigación plantea una metodología para modelar numéricamente la capacidad de carga de una cimentación superficial apoyada sobre un suelo fino que presenta variabilidad espacial en sus propiedades físico-mecánicas. Esta modelación se realiza a través del Software Plaxis 2D y los resultados obtenidos se compararon con los encontrados por (Garzón, 2019). Adicionalmente, se evaluó la manera idónea de incorporar los parámetros geotécnicos al software, la

creación y configuración del entorno de análisis, se determinaron las condiciones de frontera, tipo de modelo de análisis a emplear y las secuencias del montaje por etapas.

2. MODELACIÓN FÍSICA

En su estudio, (Garzón, 2019) aplicó el método propuesto por (El-Kadi & Williams, 2000) para la generación de campos aleatorios. Este enfoque se utilizó con el propósito específico de generar un campo aleatorio que facilitara el examen detallado de la variabilidad espacial del límite líquido en una masa de suelo. Los detalles de este proceso se encuentran minuciosamente explicados en el capítulo 5 de su tesis doctoral.

En el proceso de generación del campo aleatorio, (Garzón, 2019) utilizó los parámetros específicos provenientes de Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá realizado por (INGEOMINAS & UNIANDES, 1997). Estos parámetros incluyeron el valor medio, la desviación estándar y la escala de fluctuación, elementos esenciales para la caracterización del comportamiento sísmico del suelo en esa área geográfica. La escala de fluctuación vertical δ_v , la estableció usando la metodología planteada por (Jones et al., 2002). Adicionalmente, hizo uso del software Matlab® para la descomposición matricial y usando un espacio muestral de 14 cm de largo y 8 cm de alto, con subdivisiones de 1 cm², obtuvo los campos aleatorios que se presenta en la figura 1.

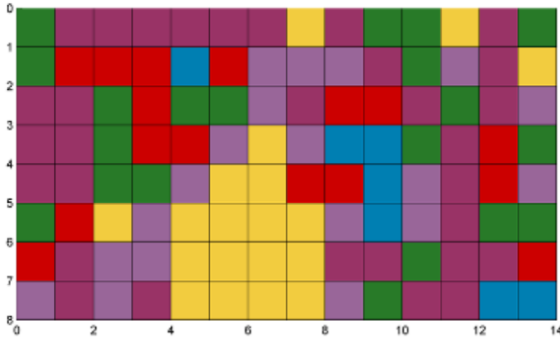


Figura 1 - Ejemplo de generación de campo aleatorio. Fuente (Garzón, 2019).

En la Figura 1, cada color dentro del cuadrado representa un suelo con diferencia del límite líquido, el campo aleatorio está representado con 8 colores los cuales representan los ocho tipos de suelos que se construyeron. Las propiedades físicas y mecánicas de cada tipo de suelo se pueden observar en las tablas 1 y 2. Los suelos de análisis se conforman de diferentes proporciones de caolín y bentonita, y con un contenido de agua equivalente a 1.5 veces el límite líquido.

Tabla 1 - Propiedades físicas de los suelos homogéneos. Fuente (Garzón, 2019).

Suelo	Caolinita (%)	Bentonita (%)	Colorante (%)	Límites de Atterberg			Gravedad específica (Gs)
				WL (%)	WP (%)	IP	
S1	80	11	9 ^d	86	35	51	2,70
S2	68	23	9 ^e	121	32	89	2,57
S3	55	33	12 ^f	157	26	131	2,59
S4	44	44	12 ^g	189	24	165	2,68
S5	31	52	17 ^h	204	20	185	2,61
S6	21	63	17 ⁱ	241	23	218	2,48
S7	10	73	17 ^j	300	29	272	2,53
S8	0	100	0	348	30	317	2,33

Tabla 2 - Propiedades mecánicas de los suelos homogéneos. Fuente (Garzón, 2019).

Suelo	Parámetros de consolidación				Prueba triaxial (CU)		Parámetros Cam Clay		
	e _o	C _c	C _s	C _v (cm ² /seg)	M	φ' (°)	λ	κ	Γ _c
S1	3,97	0,671	0,161	0,0044	0,705	18,4	0,345	0,085	0,737
S2	4,28	0,737	0,158	0,0018	0,721	18,8	0,506	0,051	0,740
S3	4,74	1,006	0,174	0,0018	0,513	13,7	0,713	0,115	1,241
S4	8,56	1,591	0,205	0,0014	0,475	12,7	0,888	0,068	1,201
S5	8,56	1,699	0,312	0,0016	0,393	10,6	1,023	0,155	1,738
S6	9,71	1,877	0,569	0,0016	0,680	17,8	1,093	0,174	1,896
S7	12,33	2,929	0,460	0,0013	0,667	17,5	1,260	0,116	1,793
S8	12,97	3,179	1,268	0,0011	0,530	14,1	1,475	0,119	2,024

La muestra de suelo dispuesta en el contenedor fue sometida a un proceso de

consolidación con el propósito de generar un estado de esfuerzos en el suelo usando la técnica de consolidación edométrica. La relación del incremento de carga (LIR) es igual a uno, por lo que (Garzón, 2019) partió de un esfuerzo de 3.75 kPa hasta llegar a una carga máxima de 30 Kpa.

Posteriormente, el modelo consolidado se transfirió a la centrífuga geotécnica, y se sometió a una aceleración de 50 gravedades durante un tiempo de permanencia de 30 minutos. El objeto de consolidar la muestra en la centrífuga geotécnica fue homogenizar los esfuerzos generados durante la fase de consolidación edométrica.

Finalmente, la prueba de capacidad de carga comenzó después de consolidar el modelo físico en la centrífuga geotécnica por 30 minutos. Para lo cual, se ensambló un dispositivo de micro carga sobre el modelo físico, el sistema se aceleró a 50 gravedades y se registró la carga que experimenta la cimentación cuando se desplaza a una velocidad de 0.05 mm/min. La prueba finalizó cuando se alcanzó un desplazamiento máximo de 20 mm.

3. MODELACIÓN NUMERICA

De los 55 modelos planteados por (Garzón, 2019), 50 corresponden a modelos heterogéneos y 5 modelos homogéneos. Los modelos heterogéneos se conforman de 6 configuraciones que variaban sus propiedades del límite líquido, media μ_{WL} , Coeficiente de variación COV, distancias de correlación horizontal y vertical δ_h , δ_v . En este trabajo se recrearon esos modelos y se construyeron en total 51 modelos diferentes, de los cuales 50 corresponden a modelos heterogéneos y el restante se modelo para un suelo homogéneo.

Para los modelos heterogéneos se realizaron seis configuraciones diferentes. Para las primeras tres configuraciones, se utilizó una media del límite líquido de 157%,

coeficiente de variación del límite líquido de 30%, escala de fluctuación vertical del límite líquido de 1.5m y la fluctuación horizontal se dejó como propiedad variable, tomando valores de 1.5m, 6m y 15m. Para cada una de estas fluctuaciones horizontales se realizaron 10 modelos, para un total de 30 modelos.

Las tres últimas configuraciones se construyeron con una media del límite líquido del 157%, escala de fluctuación vertical de 1.5 m, escala de fluctuación horizontal de 1.5m, en este caso se varió el coeficiente de variación dándole valores de 51%, 30% y 13%. Para un total de 20 modelos. Para el caso específico de COV igual a 30% esta configuración se modelo dentro de las tres primeras configuraciones. Finalmente, para el modelo homogéneo se tomó, un límite líquido fue de 157%. La tabla 3 muestra el detalle de los modelos construidos.

Tabla 3 - Detalle de los modelos numéricos simulados.

Configuración del campo aleatorio	# de modelaciones
$\delta_h = 1.5$ m	10
$\delta_h = 6,0$ m	10
$\delta_h = 15,0$ m	10
COV=13%	10
COV=30%	10
COV=51%	10
Homogéneo	1

4. RESULTADOS

Para cada modelo construido, se generaron gráficas detalladas de esfuerzo vs. deformación. Siguiendo la metodología establecida por (Garzón, 2019), se llevó a cabo la medición de los esfuerzos hasta una profundidad de 20 mm. La determinación de la capacidad de carga se realizó bajo un criterio de servicio que equivalía al 10% de

deformación con respecto a la base del cimentamiento.

Los resultados se agruparon en tres grupos, el modelo homogéneo, modelos heterogéneos con diferentes valores de coeficiente de variación COV 13%, COV 30% y COV 51% y los modelos con variación de la distancia de correlación horizontal $\delta h=1.5m, 6m$ y $15m$.

4.1. Modelo Homogéneo

La figura 2, presentan el resultado del modelo homogéneo cuyos parámetros de modelación fueron los siguientes $\mu WL=157\%$, COV 0% y $\delta h=0$. Para este modelo se obtuvo un valor de capacidad de carga es 30.8 kPa.

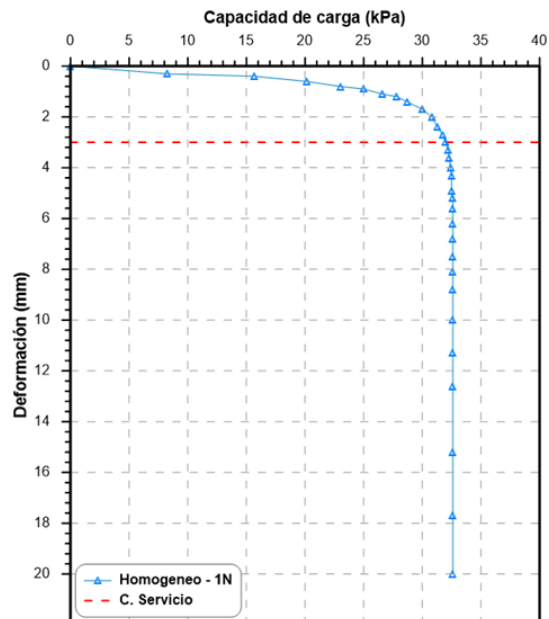


Figura 2 - Curvas esfuerzo Vs deformación modelo homogéneo.

4.2. MODELOS HETEROGÉNEOS CON DIFERENTES VALORES DE COEFICIENTE DE VARIACIÓN, COV

Las Figuras 3, 4 y 5 muestran las modelaciones obtenidas a partir del campo aleatorio, considerando una media del

límite líquido (μ WL) de 157%, una distancia de correlación horizontal (δh) de 1.5m y un coeficiente de variación (COV) del 13%, 30% y 51% respectivamente.

Los valores de capacidad de carga para la cimentación superficial con un coeficiente de variación (COV) igual al 13% oscilaron entre 22.3 kPa y 27.0 kPa, con un valor medio de 24.6 kPa. El rango de variación es de 4.7 kPa, y la desviación estándar es de 1.3 kPa.

Los valores de capacidad de carga para la cimentación superficial con un coeficiente de variación (COV) igual al 30% oscilaron entre 21.9 kPa y 29.7 kPa, con un valor medio de 25.2 kPa. El rango de variación es de 7.8 kPa, y la desviación estándar es de 2.0 kPa.

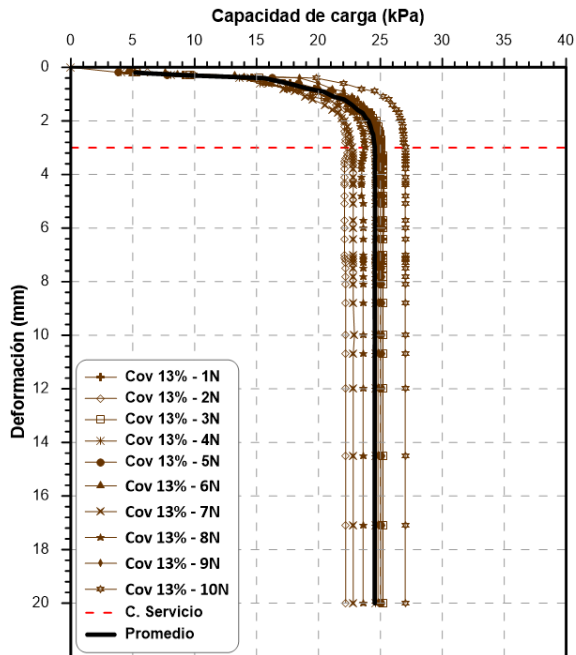


Figura 3 - Curvas esfuerzo Vs deformación Cov=13%.

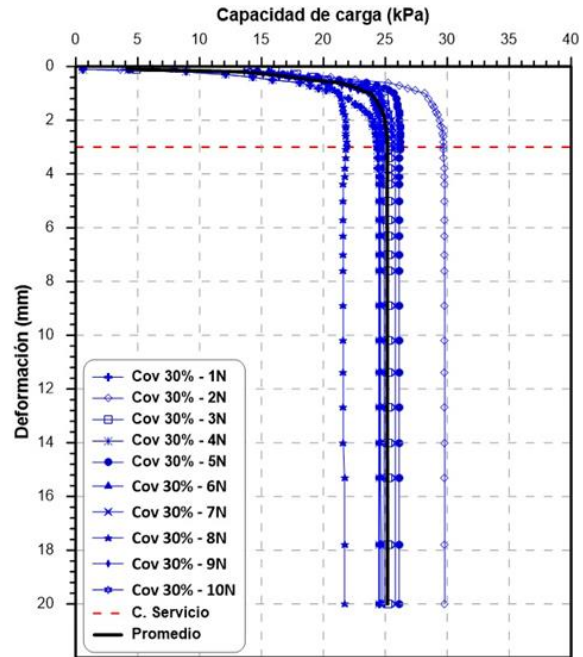


Figura 4 - Curvas esfuerzo Vs deformación Cov=30%.

Los valores de capacidad de carga para la cimentación superficial con un coeficiente de variación (COV) igual al 51% oscilaron entre 24.7 KPa y 29.6 KPa, con un valor medio de 26.6 KPa. El rango de variación es de 4.9 KPa, y la desviación estándar es de 1.5 Kpa.

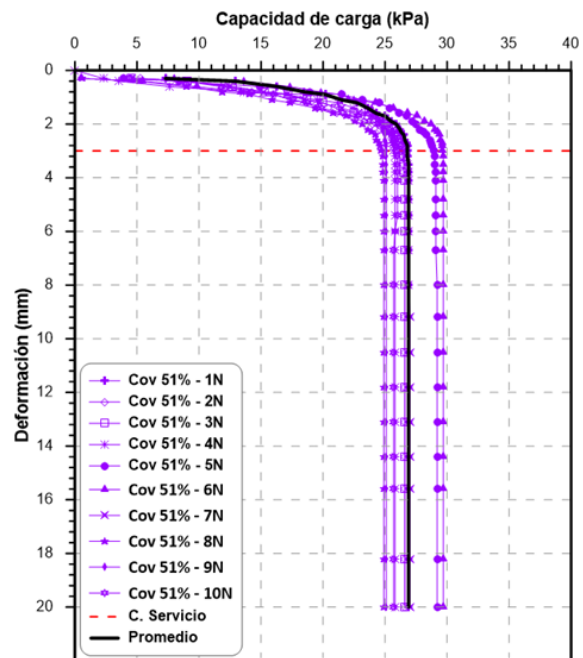


Figura 5 - Curvas esfuerzo Vs deformación Cov=51%.

4.3. MODELO HETEROGÉNEO CON DIFERENTES DISTANCIAS DE CORRELACIÓN DE HORIZONTAL, δh .

En las figuras 6, 7 y 8 se exhiben la gráfica de esfuerzo vs. deformación correspondiente a los modelos heterogéneos generado a partir de un campo aleatorio con una media del límite líquido (μ_{WL}) de 157%, un coeficiente de variación (COV) del 30%, y una distancia de correlación horizontal (δh) de 1.5m, 6.0 m y 15.0m respectivamente.

Los valores de capacidad de carga para la cimentación superficial con una distancia de variación horizontal (δh) igual al 1.5m oscilaron entre 21.9 kPa y 29.7 kPa, con un valor medio de 25.2 kPa. El rango de variación es de 7.8 kPa, y la desviación estándar es de 2.0 kPa.

Los valores de capacidad de carga para la cimentación superficial con una distancia de variación horizontal (δh) igual al 6.0m oscilaron entre 20.9 kPa y 31.7 kPa, con un valor medio de 25.9 kPa. El rango de variación es de 10.8 kPa, y la desviación estándar es de 3.5 kPa.

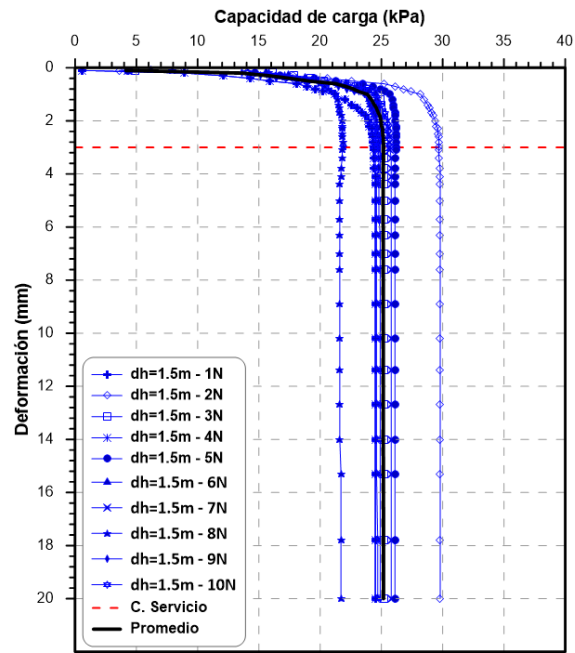


Figura 6 - Curvas esfuerzo Vs deformación $\delta h=1.5m$.

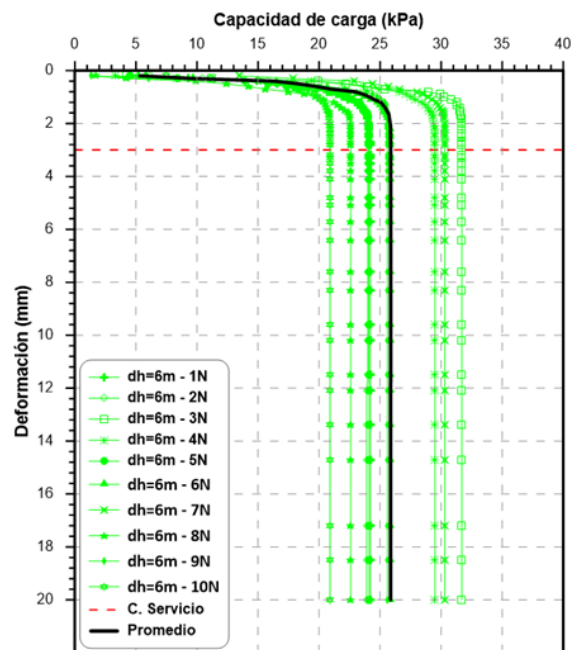


Figura 7 - Curvas esfuerzo Vs deformación $\delta h=6.0m$.

Los valores de capacidad de carga para la cimentación superficial con una distancia de variación horizontal (δh) igual al 15.0m oscilaron entre 20.5 kPa y 35.1 kPa, con un valor medio de 25.6 kPa. El rango de

variación es de 14.6 kPa, y la desviación estándar es de 4.5 kPa.

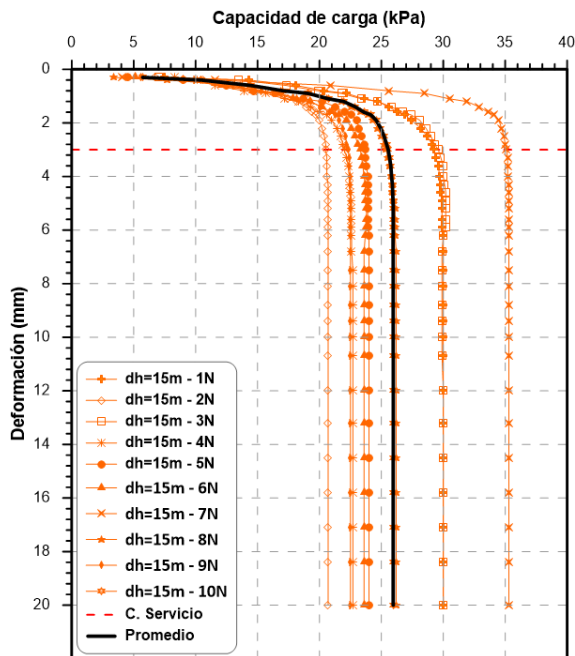


Figura 8 - Curvas esfuerzo Vs deformación $\delta h=15m$.

Cada gráfica evidencia la presencia de cierta dispersión entre las diferentes modelaciones de una misma configuración estadística. Es decir, a pesar de que el campo aleatorio se construye con el mismo valor de coeficiente de variación y distancia de correlación horizontal, cada campo aleatorio exhibe una distribución diferente de las propiedades del suelo

Esta variabilidad en la distribución de suelos tiene un impacto directo en el comportamiento de la capacidad de carga. Aunque cada campo aleatorio fue construido considerando los mismos parámetros de coeficiente de variación y distancia de correlación horizontal, las diferencias en la distribución de suelos entre las modelaciones dan lugar a resultados ligeramente diferentes. Este fenómeno resalta la influencia significativa de la variabilidad espacial en las propiedades del suelo en la respuesta de la cimentación superficial.

5. ANALISIS Y DISCUSION

En esta sección, se presentan gráficas comparativas que ilustran los resultados de los modelos físicos y numéricos, junto con sus respectivos análisis. En los gráficos proporcionados, los modelos numéricos se identifican con la letra (N), mientras que los modelos físicos se designan con la letra (F). La letra (δh) refiere a la distancia de correlación horizontal, y (COV) al coeficiente de variación.

Se llevaron a cabo análisis estadísticos que incorporaron medidas clave como la desviación estándar, el rango, el promedio y el análisis de varianza de un factor. Estos análisis fueron esenciales para contrastar los datos derivados de los modelos numéricos con aquellos obtenidos en los modelos físicos. El objetivo principal fue validar la reproducibilidad de los resultados y la efectividad de la calibración de la metodología propuesta para simular la variabilidad espacial de un suelo en el análisis de la capacidad portante.

La utilización del software Plaxis 2D desempeñó un papel fundamental en este proceso, permitiendo la implementación y evaluación de la metodología propuesta. Los análisis estadísticos proporcionaron una base cuantitativa para comparar y validar la coherencia entre los resultados obtenidos a través de la simulación numérica y los modelos físicos.

La figura 9 exhibe la curva de capacidad de carga-deformación, la cual refleja los resultados de los modelos numéricos donde se varió la distancia de correlación horizontal. Esta representación gráfica posibilitó una comparación directa entre la respuesta de estos modelos y la del modelo homogéneo.

En esta figura, se observa una reducción sustancial en la capacidad de carga en comparación con el modelo homogéneo. Los valores promedios de capacidad de carga para los modelos que consideraron

distancias de correlación horizontal de 1.5m, 6m y 15m son 25.2 kPa, 25.9 kPa y 25.6 kPa respectivamente, mientras que para el modelo homogéneo la capacidad de carga fue de 30.8 kPa

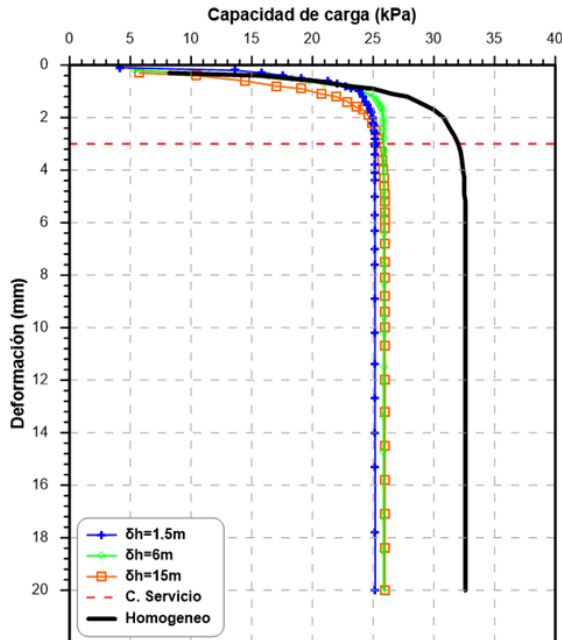


Figura 9 - Efecto de la distancia de correlación horizontal (δh) en la capacidad de carga.

Por el contrario, también se observa que la incidencia de la variación de la correlación horizontal en la capacidad de carga es mínima si comparamos entre sí los suelos heterogéneos. Aunque se evidencia una reducción general de la capacidad de carga con la variación de la distancia de correlación horizontal, la magnitud de esta variación no parece ser significativamente influenciada.

La figura 10 presenta la curva de capacidad de carga versus deformación, exhibiendo los resultados de los modelos numéricos donde se varió el coeficiente de correlación. En esta representación, se observa claramente la respuesta de los modelos numéricos modelados con variación en el coeficiente de correlación, y se contrasta con la del modelo homogéneo.

En esta figura, se destaca el efecto del coeficiente de variación en la capacidad de

carga, ratificando la observación de que un suelo con variabilidad espacial de sus propiedades presenta una capacidad de carga menor en comparación con un suelo homogéneo. Además, se evidencia que el coeficiente de variación influye en mayores proporciones en la capacidad de carga en comparación con la distancia de correlación horizontal.

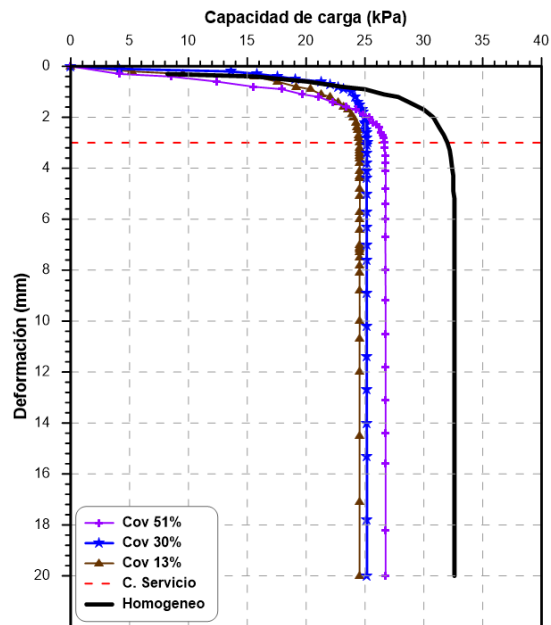


Figura 10 - Efecto de la variación del (Cov) en la capacidad de carga.

Los valores de capacidad de carga obtenidos para coeficientes de variación del 13%, 30%, y 51%, son respectivamente 24.6 kPa, 25.2 kPa y 26.6 kPa. Este análisis cuantitativo revela cómo el incremento en el coeficiente de variación conlleva a una mayor reducción en la capacidad de carga, sin embargo, no hay una diferencia significativa entre los resultados y por tanto no se puede determinar con precisión la incidencia de este parámetro en la capacidad portante.

Es interesante destacar que al igual que los modelos numéricos modelados con variación en la distancia de correlación horizontal, los modelos que incorporan variación en el coeficiente de correlación también muestran una reducción en la capacidad de carga en comparación con el

modelo homogéneo. Este hallazgo sugiere el impacto significativo que tiene la variabilidad espacial de un suelo en la capacidad de carga y las deformaciones del sistema.

Al analizar las figuras 9 y 10, se observa que el parámetro del coeficiente de variación, en comparación con la distancia de correlación horizontal, afecta en mayor proporción el valor de capacidad de carga de una cimentación. Los límites inferior y superior para el coeficiente de variación muestran una variación significativa, con un rango de 2.1 kPa (equivalente al 6.7% respecto a la capacidad de carga del suelo homogéneo).

En contraste, al considerar la distancia de correlación horizontal, los límites inferior y superior presentan una variación más moderada, con un rango de 0.7 kPa (equivalente al 2.2% respecto a la capacidad de carga del modelo homogéneo). Estos resultados destacan la mayor sensibilidad de la capacidad de carga frente a variaciones en el coeficiente de variación en comparación con la distancia de correlación horizontal,

La incidencia del parámetro del coeficiente de variación en el rango de variación de los resultados es considerablemente mayor, siendo aproximadamente tres veces superior en comparación con la distancia de correlación horizontal. Este hallazgo subraya la significativa influencia del coeficiente de variación en la capacidad de carga de una cimentación, resaltando su papel determinante en la variabilidad de los resultados obtenidos.

Según los modelos implementados, se determina que la reducción de la capacidad de carga al considerar un suelo con variabilidad espacial de sus propiedades físicas y mecánicas, respecto a un suelo homogéneo, varía significativamente entre el 13.6% y el 20.3%. Estos valores corresponden a los modelos con coeficientes de variación del 51% y 13%,

respectivamente. Estos resultados proporcionan una visión clara de la magnitud de la influencia del coeficiente de variación en la capacidad de carga y respaldan la importancia crítica de considerar este parámetro en análisis geotécnicos detallados.

La figura 11 presenta las curvas esfuerzo vs deformación tanto de los resultados de los modelos numéricos como los modelos físicos considerando únicamente la distancia de correlación horizontal. En esta figura se observa una reducción uniforme de la capacidad de carga de los modelos físicos y numéricos en comparación con el modelo homogéneo.

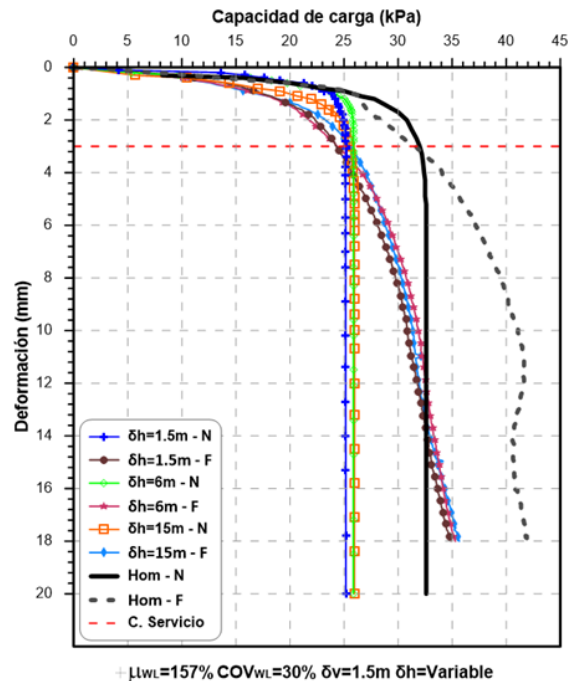


Figura 11 - Efecto de la variación de δh en la capacidad de carga en modelos físicos y numéricos.

En esta figura, se observa que tanto los modelos físicos como los modelos numéricos muestran una disminución en la capacidad de carga. El rango de variación de los resultados en los modelos numéricos es de 0.7 kPa, mientras que en los modelos físicos es de 1.3 kPa. Este hallazgo indica un comportamiento similar entre los modelos físicos y numéricos con respecto al

efecto de la distancia de correlación horizontal en la capacidad de carga. Estas observaciones refuerzan la consistencia y validez de la modelación numérica en capturar la influencia de la distancia de correlación horizontal en el comportamiento estructural.

Los valores de capacidad de carga obtenidos para diferentes distancias de correlación horizontal son los siguientes: 25.2 kPa para una distancia de 1.5m, 25.9 kPa para 6m y 25.6 kPa para 15m, para una profundidad de análisis de 3mm. Aunque se observa una variación limitada en los resultados de capacidad de carga al considerar diferentes distancias de correlación, al comparar estos valores con el resultado del modelo homogéneo de 30.8 kPa, se revela una reducción significativa del orden del 17%.

Esta reducción del 17% en la capacidad de carga subraya la importancia de la variabilidad espacial del suelo, incluso en distancias de correlación horizontal que podrían considerarse relativamente cercanas entre sí. A pesar de la aparente poca variación en los resultados entre las diferentes distancias de correlación, la comparación con el modelo homogéneo resalta la influencia crítica de la variabilidad espacial en el comportamiento de la capacidad de carga de la cimentación.

Al analizar los resultados entre el modelo numérico y el modelo físico, se observa una notable similitud en la capacidad de carga durante los primeros 3 mm, equivalente a una deformación del 10% respecto al ancho del cimiento. Sin embargo, al profundizar en el análisis, se evidencian diferencias significativas en las pendientes de las curvas, marcando contrastes notables a medida que se explora en profundidad.

Esta divergencia en las pendientes sugiere que, a pesar de la similitud en la capacidad de carga inicial, hay discrepancias sustanciales en el comportamiento del suelo a medida que la carga se incrementa y la deformación progresa. Estas

observaciones destacan la existencia de una brecha significativa en la capacidad de los modelos numéricos para replicar de manera precisa el comportamiento del suelo en comparación con los modelos físicos.

La figura 12 presenta las curvas esfuerzo vs deformación tanto de los resultados de los modelos numéricos como los modelos físicos considerando únicamente el coeficiente de correlación. En esta figura, se observa claramente el efecto del coeficiente de variación en la reducción de la capacidad de carga en un cimiento apoyado sobre un suelo fino con variabilidad espacial de sus propiedades físicas y mecánicas.

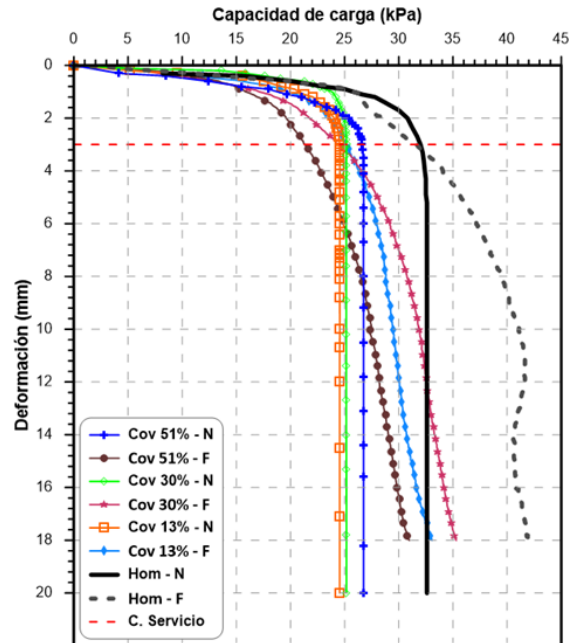


Figura 12 - Efecto de la variación del (COV) en la capacidad de carga en modelos físicos y numéricos.

En los modelos numéricos, la mayor reducción se evidenció en el modelo con un coeficiente de variación del 13%, seguido por el modelo con un coeficiente del 30%. De manera interesante, el modelo con un coeficiente de variación del 51% mostró el menor impacto en la reducción de la capacidad de carga en comparación con el modelo homogéneo. Estos resultados revelan un comportamiento inversamente

proporcional entre el coeficiente de variación y la reducción de la capacidad de carga. Cuanto menor es el coeficiente de variación, mayor es la reducción de la capacidad de carga

Por otro lado, los valores de capacidad de carga de los modelos físicos exhiben una reducción en comparación con el modelo homogéneo. Sin embargo, en este caso, el comportamiento de la reducción en la capacidad de carga es directamente proporcional al coeficiente de variación. Este hallazgo contrasta con los resultados obtenidos en los modelos numéricos, indicando que el modelo numérico no puede simular de manera precisa el comportamiento observado en los modelos físicos.

Estas diferencias en el comportamiento de la reducción de la capacidad de carga entre los modelos numéricos y físicos resaltan la complejidad de replicar con precisión la variabilidad espacial del suelo mediante modelos numéricos. La comprensión de estas discrepancias es crucial para mejorar la fidelidad de los modelos numéricos y garantizar su aplicabilidad en la simulación precisa del comportamiento geotécnico del suelo.

Se destaca que los resultados de los modelos físicos y numéricos se sitúan dentro de un rango de capacidad de carga de 5.3 kPa, indicando una notable aproximación en la región donde la gráfica intercepta el criterio de servicio. Sin embargo, al analizar a grandes deformaciones, es decir, superiores a 3 mm, se observa una mayor dispersión entre los resultados de los modelos físicos y numéricos.

En este contexto, es importante señalar que el software, al abordar deformaciones considerables, no logra reproducir adecuadamente la resistencia residual después de la falla del terreno. El software asume una falla súbita del suelo, mientras que en condiciones reales se sabe que el

suelo mantiene una resistencia residual. Este fenómeno es claramente evidenciado en los modelos físicos generados por (Garzón, 2019)

Estas observaciones resaltan las limitaciones del software en la simulación de condiciones realistas a grandes deformaciones, subrayando la necesidad de abordar con precaución el análisis en esta región y considerar mejoras en la capacidad del software para capturar el comportamiento geotécnico del suelo en situaciones de deformación significativa.

La figura 13 evidencia de manera clara la incidencia del coeficiente de variación en el comportamiento de la capacidad de carga de una cimentación. Para proporcionar una comparación significativa, la capacidad de carga de cada coeficiente de variación se normalizó con respecto a la capacidad de carga del modelo homogéneo, tanto para los modelos físicos como para los modelos numéricos.

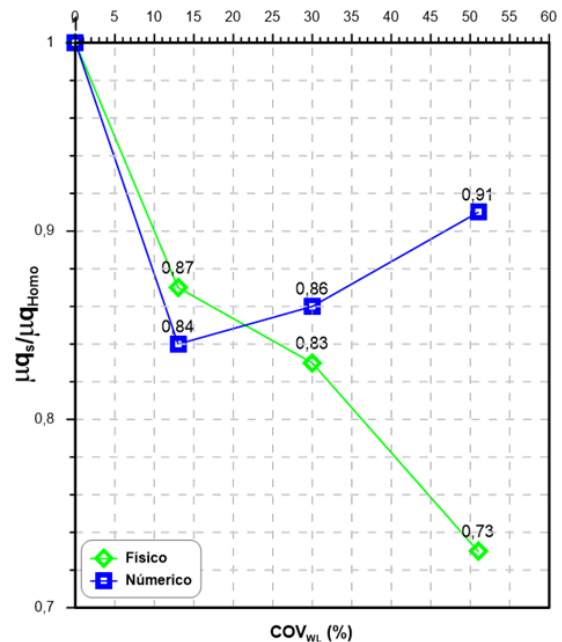


Figura 13 - Curva normalizada del coeficiente de variación (Cov) respecto al modelo homogéneo.

La tendencia general en el comportamiento de la capacidad de carga en función del coeficiente de variación muestra que, a

mayor coeficiente de variación, menor es la capacidad de carga. Los valores obtenidos de porcentaje de reducción en los modelos físicos son los siguientes: para coeficiente de variación del 13%, la reducción es del 87%; para coeficiente de variación del 30%, la reducción es del 83%; y para coeficiente de variación del 51%, la reducción es del 73%.

En el caso de los modelos numéricos, el comportamiento de la capacidad de carga difiere del observado en los modelos físicos. Se destaca que, a mayor coeficiente de variación, menor es la reducción en la capacidad de carga. Los resultados obtenidos son los siguientes: para coeficiente de variación del 13%, la reducción es del 84%; para coeficiente de variación del 30%, la reducción es del 86%; y para coeficiente de variación del 51%, la reducción es del 91%.

Al comparar los valores normalizados de los modelos físicos y numéricos para un coeficiente de variación del 13%, se evidencia una similitud significativa en los resultados. Lo mismo ocurre para el coeficiente de variación del 30%. Sin embargo, al comparar los valores obtenidos de reducción de capacidad de carga para un coeficiente de variación del 51%, se observa una diferencia significativa, equivalente a un 18%.

Al analizar el comportamiento de la capacidad de carga para diferentes coeficientes de variación, se evidencia una clara discrepancia en la tendencia entre el modelo numérico y los modelos físicos. Esta disparidad podría asociarse a que los modelos numéricos, si bien buscan replicar las condiciones reales en cuanto al comportamiento de las cimentaciones, no siempre logran reproducir con la exactitud requerida las complejidades observadas en situaciones prácticas.

En el contexto específico de esta investigación, se observa que los modelos numéricos no muestran la misma tendencia

de reducción de la capacidad de carga respecto al coeficiente de variación que se presenta en los modelos físicos. Este desacuerdo puede deberse a las limitaciones o simplificaciones inherentes en la representación numérica de los fenómenos geotécnicos, así como a la sensibilidad a las condiciones iniciales y a la precisión de los parámetros utilizados en los modelos.

La figura 14 ilustra la incidencia de la distancia de correlación horizontal en la reducción de la capacidad de carga de un cimiento apoyado sobre un suelo fino con variabilidad espacial de sus propiedades físicas y mecánicas. En verde se muestra el comportamiento del modelo físico, mientras que en azul se presenta el comportamiento del modelo numérico. Ambos casos exhiben la tendencia de que, a mayor distancia de correlación horizontal, menor es la reducción en la capacidad de carga.

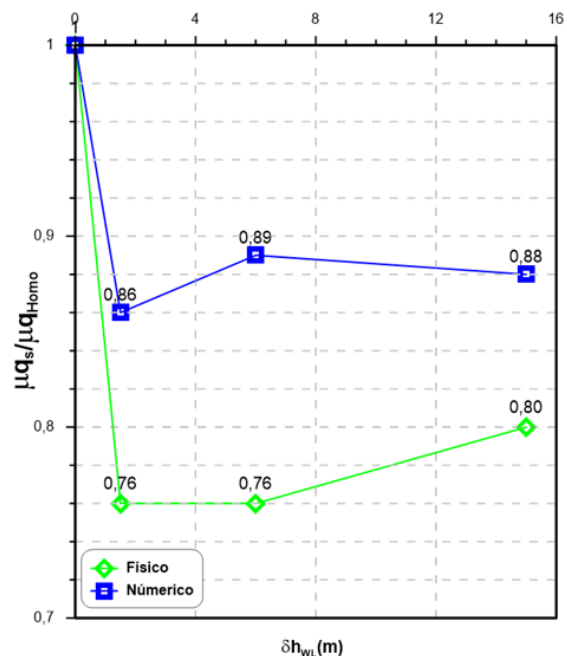


Figura 14 - Curva normalizada de la distancia de correlación horizontal (δh) respecto al modelo homogéneo.

Sin embargo, este comportamiento no es muy pronunciado, ya que las variaciones entre las diferentes distancias de

correlación horizontal son mínimas. Para los modelos numéricos, se obtienen valores del 86% para $\delta h=1.5m$, 89% para $\delta h=6m$ y 88% para $\delta h=15m$. Se observa una variación de apenas el 3% entre las diferentes distancias de correlación horizontal.

En los modelos físicos, los valores obtenidos de reducción de capacidad de carga respecto al modelo homogéneo, influenciados por la distancia de correlación horizontal, son del 76% para $\delta h=1.5m$, 76% para $\delta h=6m$ y 80% para $\delta h=15m$. Estos resultados reflejan una consistencia en la tendencia de reducción de la capacidad de carga a medida que aumenta la distancia de correlación horizontal.

En paralelo, en los modelos numéricos se observan resultados similares, con valores del 86% para $\delta h=1.5m$, 89% para $\delta h=6m$ y 88% para $\delta h=15m$. Las diferencias entre los valores de reducción de la capacidad de carga son mínimas para las diferentes distancias de correlación horizontal, presentando un rango de variación de apenas el 4%.

Las figuras 13 y 14 ofrecen una perspectiva clara de que los modelos físicos exhiben una mayor reducción en la capacidad de carga en comparación con los modelos numéricos. A pesar de que los modelos numéricos muestran una buena aproximación a los resultados obtenidos en los modelos físicos, los valores no son exactos. Esta discrepancia se atribuye al hecho de que el modelo matemático empleado por el software constituye una aproximación al comportamiento real del suelo.

Es importante destacar que los modelos numéricos, si bien proporcionan una representación útil y cercana a la realidad, son simplificaciones matemáticas y, por lo tanto, no pueden replicar completamente la complejidad del comportamiento geotécnico del suelo. La variación observada en los resultados subraya la

necesidad de interpretar los datos numéricos con un entendimiento de las limitaciones inherentes al modelo.

6. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo la implementación de los 55 modelos físicos propuestos en la tesis doctoral "Physical modeling of soil spatial variability: application to shallow foundation," desarrollada por Garzón (2019), mediante el software de análisis geotécnico Plaxis 2D. Esta etapa del estudio posibilitó la calibración de los modelos numéricos y estableció una metodología robusta para replicar modelos físicos en una centrifuga geotécnica utilizando Plaxis 2D. Este avance sienta las bases para la realización de futuros análisis que involucren la variabilidad espacial de las propiedades físicas y mecánicas del suelo, permitiendo así la transición hacia análisis geotécnicos más refinados que brinden una comprensión más precisa del comportamiento del suelo.

Se llevó a cabo una comparación entre los resultados obtenidos en la tesis doctoral "Physical modeling of soil spatial variability: application to shallow foundation," realizada por Garzón (2019), y los resultados de la modelación numérica bajo las mismas condiciones. Los análisis numéricos se llevaron a cabo utilizando el modelo geotécnico de Cam Clay modificado, reconocido por su capacidad para reproducir de manera precisa los modelos físicos. Sin embargo, es importante destacar que, aunque el software Plaxis 2D es una herramienta muy versátil, no se logra reproducir con precisión esfuerzos y deformaciones hasta un 10% de deformación con respecto al ancho del cimiento, aunque se tiene cierto grado de aproximación, lo cual es adecuado para la determinación de la capacidad portante, no obstante, los modelos planteados, presentan limitaciones a grandes deformaciones. En estas situaciones, el software no logra replicar de manera

adecuada los esfuerzos, asumiendo una falla súbita del material, a diferencia de los modelos físicos que evidencian una resistencia residual en el suelo.

La variabilidad espacial de las propiedades físicas y mecánicas emerge como un factor crucial en la capacidad portante de una cimentación. Al revisar detenidamente los análisis, ya sean físicos o numéricos, se constata una significativa reducción cercana al 20% en comparación con los análisis que consideran suelos homogéneos.

Al comparar los resultados de los modelos numéricos con los modelos físicos, se evidencia una sobreestimación de la capacidad de carga por parte de los modelos numéricos, aproximadamente del 7%. Este fenómeno subraya la importancia de establecer modelos constitutivos precisos, secuencias de montaje correctas y la alimentación de estos modelos con resultados de ensayos de laboratorio confiables. Estos factores inciden directamente en los resultados finales de los análisis geotécnicos. Además, es esencial reconocer que los softwares generan aproximaciones del comportamiento real del suelo y tienen sus limitaciones. A pesar de ello, los resultados muestran una notable aproximación a los modelos físicos.

La disponibilidad de información proveniente de modelos físicos resulta fundamental para contrastar y validar los resultados obtenidos mediante modelos numéricos. Este proceso no solo brinda seguridad en las metodologías empleadas en los softwares de análisis, sino que también permite poner a prueba los modelos constitutivos y determinar cuáles se ajustan de manera más precisa a las condiciones reales de los cimientos. Este conocimiento adquirido puede ser aplicado con confianza en diversos tipos de análisis, incluyendo aquellos relacionados con cimentaciones profundas.

7. RECOMENDACIONES

Se sugiere realizar un estudio exhaustivo del comportamiento de la variabilidad espacial de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos en diversas ciudades de Colombia. El objetivo principal sería obtener información detallada sobre los coeficientes de variación asociados a estas propiedades. La recolección de estos datos permitiría la construcción de campos aleatorios que reflejen la variabilidad real presente en los suelos. Esta iniciativa facilitaría la ejecución de análisis geotécnicos más precisos al considerar la variabilidad espacial en las propiedades físicas y mecánicas del suelo.

Se recomienda utilizar el modelo constitutivo Cam Clay modificado en los análisis numéricos que involucren grandes y medianas deformaciones. Este modelo ha demostrado ser eficaz al reproducir de manera muy aproximada el comportamiento en términos de esfuerzo y deformación del suelo. Aunque tiene limitaciones para reproducir esfuerzos a grandes deformaciones, se destaca su adecuada aproximación dentro del rango de servicio y falla de la cimentación. Esta elección proporcionará resultados más precisos y coherentes en situaciones donde se espera una respuesta realista del suelo a diferentes niveles de carga y deformación.

Se debe utilizar datos de modelos físicos para estudiar y calibrar metodologías de análisis en software geotécnico. Este enfoque proporcionará una comprensión más profunda del alcance y las limitaciones de los programas informáticos. También permitirá la calibración precisa de los análisis y facilitará la implementación de estas metodologías en el estudio de casos reales. La metodología desarrollada en esta investigación se sugiere para aplicaciones en el estudio de cimentaciones superficiales.

8. REFERENCIAS

- Bauduin, C. (2003). *Uncertainties and their relevance for the design of deep excavations near existing structures*. In *Geotechnical problems with man-made and man influenced ground*. 445–449.
- Bhattacharya, S., Demirci, H. E., Nikitas, G., Prakhya, G. K. V., Lombardi, D., Alexander, N. A., Aleem, M., Amani, S., & Mylonakis, G. (2021). Physical modeling of interaction problems in geotechnical engineering. In *Modeling in Geotechnical Engineering* (pp. 205–256). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821205-9.00017-4>
- Chakraborty, P., & Popescu, R. (2012). Numerical simulation of centrifuge tests on homogeneous and heterogeneous soil models. *Computers and Geotechnics*, *41*, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.11.008>
- Duncan, J. M., & Member, H. (2000). FACTORS OF SAFETY AND RELIABILITY IN GEOTECHNICAL ENGINEERING. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING*, *307*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10286600601156673>
- El-Kadi, A. I., & Williams, S. A. (2000). Generating Two-Dimensional Fields of Autocorrelated, Normally Distributed Parameters by the Matrix Decomposition Technique. *Groundwater*, *38*(4), 530–532. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2000.tb00245.x>
- Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2002). Probabilistic Foundation Settlement on Spatially Random Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *128*(5), 381–390. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:5\(381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:5(381))
- Garzón, L. (2019). *Physical modeling of soil spatial variability: application to shallow foundation* [Universidad de los Andes]. <http://hdl.handle.net/1992/41304>
- Gómez, D., García-Aristizábal, E., & Aristizábal, E. (2021). Spatial and temporal patterns of fatal landslides in Colombia. In *Proceedings of the 13th International Symposium on Landslides. ISSMGE, Cartagena*, 1–8. INGEOMINAS, & UNIANDES. (1997). *Microzonificación sísmica de santafé de Bogotá*.
- James, D. W., & Wells, K. L. (2018). *Soil Sample Collection and Handling: Technique Based on Source and Degree of Field Variability* (pp. 25–44). <https://doi.org/10.2136/sssabookser3.3ed.c3>
- Jones, A. L., Kramer, S. L., & Pedro Arduino. (2002). *Estimation of uncertainty in geotechnical properties for performance-based earthquake engineering*.
- Simões, J. T., Neves, L. C., Antão, A. N., & Guerra, N. M. C. (2020). Reliability assessment of shallow foundations on undrained soils considering soil spatial variability. *Computers and Geotechnics*, *119*, 103369. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103369>
- Soubra, A.-H., Youssef, D. S., Massih, A., & Kalfa, M. (2008). *Bearing capacity of foundations resting on a spatially random soil*.
- Yamin, M. (2016). *Problem solving in foundation engineering using FoundationPro*. Springer.