

INTERACCIÓN ELÁSTICA E INELÁSTICA SUELO-ESTRUCTURA BAJO UNA FUNDACIÓN SUPERFICIAL AISLADA

Por **Mauricio Alejandro Moreno Herran**

Escuela Colombiana de Ingeniería

Resumen: El presente documento estudia el comportamiento de una zapata en concreto, aislada y con carga axial, sobre un suelo tipo recebo, con el fin de analizar la interacción suelo-estructura en el rango lineal y no lineal. La investigación incluyó la búsqueda de teoría relacionada con la interacción suelo-estructura, con diferentes autores de distintos países. Paralelamente se elaboraron tres modelos físicos a escala los cuales fueron ensayados en un banco de pruebas, especialmente construido, para forzar la interacción suelo-estructura en el rango no lineal del suelo. Finalmente los mismos modelos físicos fueron simulados en el software ANSYS, elementos finitos, con el fin de comparar los resultados.

Palabras clave: Interacción suelo-estructura, módulo de elasticidad, módulo de Poisson, cimentación superficial, recebo, asentamientos, deformaciones, elementos finitos, ANSYS.

Abstract: This paper studies the behavior of a particular footing, isolated and axial load on soil type recebo, in order to analyze the interaction soil-structure in the linear and nonlinear range. The research included finding theory related to the soil-structure interaction, with different authors from different countries. Parallel three physical scale models which were tested in a test, specially constructed to force the interaction soil-structure in the nonlinear range of soil were developed. Finally the same physical models were simulated in software ANSYS finite elements, in order to compare results.

Keywords: soil-structure interaction, modulus of elasticity, Poisson's modulus, shallow foundation, subsoil, settlements, deformation, finite element, ANSYS.

1. Introducción

La presencia de una estructura modifica el comportamiento del suelo natural, lo que es conocido como interacción suelo-estructura. Las filosofías de diseño estructural tradicionales se centran en diseñar el elemento de fundación sin considerar la

interacción suelo-estructura¹ o considerándola en el rango elástico, cuando el verdadero comportamiento del suelo, dada su naturaleza, indica que no es elástico. Las características de la estructura, de la fundación y del suelo afectan directamente la interacción suelo-estructura. Omitir dicha interacción se traduce en un error puesto que el suelo no es infinitamente rígido ni presenta comportamientos netamente elásticos.

Aumentando el esfuerzo se llegará al punto de la falla, el cual es difícil de determinar y depende de las tres fases que conforman el suelo. Además las deformaciones bajo los cimientos por lo general no son proporcionales a los esfuerzos y cambian con el tiempo (comportamiento viscoso). Por este motivo es importante definir la rigidez finita del suelo, a partir de las propiedades mecánicas básicas del mismo (módulo de deformación axial, E , y módulo de Poisson, μ), así como el comportamiento particular del cimiento (rígido o flexible) y el desempeño del conjunto ante las solicitaciones de trabajo en el periodo de servicio.

En el análisis de la superestructura (edificios bajos) comúnmente se considera que los apoyos están empotrados, asumiendo que no hay deformaciones (asentamientos) ni giros. Bajo estos supuestos se determinan las cargas que bajan a la cimentación y se transmiten al suelo. La realidad es otra debido a que el suelo siempre se va a deformar causando que el o los apoyos empotrados se comporten más como una articulación. Esto genera un efecto en la distribución de esfuerzos estimada en toda la estructura que debe revisarse cuidadosamente, al igual que las cargas transmitidas al suelo de fundación. En edificios altos sí es necesario considerar la interacción suelo-estructura desde un comienzo en los análisis.

Al definir de una manera más real la reacción del suelo bajo el cimiento por su comportamiento elástico (realmente muy corto) al principio y luego inelástico, se puede modelar un comportamiento más adecuado de la estructura y obtener diagramas de esfuerzos de los elementos de la fundación (momentos y de cortantes), a corto y largo plazo, ajustados al comportamiento real del elemento estructural.

El presente estudio realiza un análisis experimental y analítico, mediante modelos a escala y de elementos finitos con el programa ANSYS, la interacción suelo-estructura en unas zapatas de concreto aisladas bajo una carga axial estática que se incrementa gradualmente.

2. Metodología

Se construyeron tres (3) modelos experimentales de una cimentación superficial tipo zapata aislada, los cuales se elaboraron en concreto a una escala estimada 1:2.5 por la limitación de carga máxima a aplicar con el gato que es de 20ton de capacidad. Es de aclarar que las zapatas no hicieron parte de pórticos ni estuvieron unidas a otros elementos de cimentación mediante vigas de amarre o vigas de

¹ PECK, HANSON AND THORNBURN. 2009.

contrapeso, puesto que lo que se pretendió fue analizar puramente el comportamiento de las zapatas a flexión bajo cargas céntricas.

Tabla 1. Enumeración de zapatas

Nombre	Dimensiones
Zapata 1	630mm x 630mm x 150mm
Zapata 2	630mm x 630mm x 120mm
Zapata 3	630mm x 630mm x 140mm

Para la **zapata 1** se realizó un diseño de mezcla (según comité 211 del ACI²) y se tomaron cilindros. Esta zapata se fundió el 26 de julio y la prueba se hizo el 20 de agosto de 2014 (**24 días de edad**).

Con base en los resultados de la zapata 1, las deflexiones medidas, las fisuras en el concreto, el comportamiento del suelo³ y la tesis del ingeniero Gustavo Alberto López Duque, donde se analizaron zapatas hasta de 100mm de espesor, se definieron las dimensiones de las 2 losas finales a ensayar, las cuales se determinaron de la misma dimensión en planta pero de espesores menores y conservando la misma resistencia de diseño para evitar una falla súbita del concreto sin lograr un buen rango de mediciones experimentales.

Las zapatas 2 y 3 se fundieron el 13 de septiembre y el 1 de noviembre de 2015 se fallaron.



Figura 2.1. Zapata 1 durante la prueba de carga

² American Concrete Institute, ACI-211.1-9, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete"

³ En el capítulo 5.3 y 5.4 se presentan los datos y análisis de las zapatas ensayadas

Las zapatas construidas se colocaron sobre el recebo preparado previamente antes de cada prueba y se sometieron a una carga axial con incremento gradual en etapas, la cual se aplicaba por medio de una celda de carga y un gato hidráulico. En todos los especímenes se instrumentaron puntos claves de los cimientos con deformímetros instalados en la parte superior de los mismos, para posterior documentación y análisis de los resultados en cada etapa de carga.

El suelo donde se realizaron las pruebas se acondicionó excavando un rectángulo de 2,0m x 2,0m x 1,20m, el cual fue remplazado y rellenado con recebo, el cual fue compactado al 90% del Proctor Modificado con el fin de tener un suelo que permitiera el comportamiento elástico e inelástico buscado.

Para la ejecución de las pruebas experimentales de las zapatas, fue necesario construir un pórtico de reacción, el cual está conformado por columnas y vigas metálicas con perfil IPE-360, apoyado sobre 2 bloques o macizos en concreto reforzados, dimensionados para resistir las cargas máximas esperadas a aplicar a las zapatas. El diseño del pórtico de pruebas fue diseñado y construido en conjunto con la ingeniera Mary González, quien realizó un trabajo de grado cuyo objeto fue “estudio de la interacción suelo-estructura en el rango elástico e inelástico de una zapata aislada mediante modelos físicos a escala y mediante elementos finitos” donde experimentó con placas metálicas de dos espesores diferentes sobre el recebo y sobre resortes con su correspondiente modelación en ANSYS.

3. Análisis Experimental

3.1 Pre-diseño del montaje para las pruebas

Para determinar o definir el tamaño del pórtico de pruebas descrito en el capítulo anterior **se estableció una capacidad portante del suelo de relleno en 120kN/m² (12t/m²)**, que es típica para suelos tipo recebo, puesto que al inicio del trabajo no se tenía el material de relleno.

3.2 Calculo y dimensionamiento zapatas

Una vez estimada la carga máxima teórica probable para aplicar a los elementos estructurales, se pre-dimensiona la primera zapata basado con la teoría de que el esfuerzo bajo el suelo es uniforme. Se aclara que por ser un proceso controlado tanto en la construcción de los modelos experimentales como en la aplicación de las cargas y con el ánimo de estimar la carga real de falla, se determina utilizar los factores de mayor ración de cargas y de reducción de resistencia iguales a uno (1)⁴.

⁴ Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, numeral B.2.4.2 y C.9.3.2, respectivamente.

3.3 Pruebas experimentales

La prueba de la zapata 1 se realizó el 20 de agosto y las pruebas de las zapatas 2 y 3 se realizaron el 1 de noviembre. En la siguiente gráfica se aprecia la configuración típica de la instalación de deformímetros.

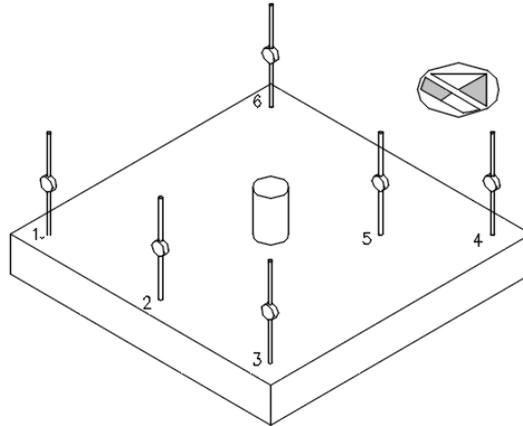


Figura 3.1. Esquema localización de deformímetros.

Nota: el norte indicado corresponde al norte geográfico

3.4 Análisis de resultados

Tabla 2. Deformaciones zapata 1

Unidad de carga	Carga (kg)	$\Delta 1$ (mm)	$\Delta 2$ (mm)	$\Delta 3$ (mm)	$\Delta 4$ (mm)	$\Delta 5$ (mm)	$\Delta 6$ (mm)	Esfuerzo en el suelo (N/mm ²)	Carga (kN)
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
7	470	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	4.6
20	1,344	-0.10	-0.16	-0.27	-0.28	-0.27	-0.26	0.03	13.2
30	2,015	-0.30	-0.39	-0.52	-0.60	-0.73	-0.49	0.05	19.8
40	2,687	-0.43	-0.46	-0.72	-0.86	-0.72	-0.64	0.07	26.4
50	3,359	-0.58	-0.70	-0.91	-1.07	-0.90	-0.79	0.08	32.9
60	4,031	-0.71	-0.85	-1.07	-1.25	-1.06	-0.91	0.10	39.5
70	4,702	-0.83	-0.99	-1.22	-1.43	-1.21	-1.04	0.12	46.1
80	5,374	-0.97	-1.11	-1.37	-1.63	-1.35	-1.14	0.13	52.7
90	6,046	-1.15	-1.28	-1.54	-1.84	-1.52	-1.28	0.15	59.3
100	6,718	-1.28	-1.44	-1.70	-2.03	-1.70	-1.39	0.17	65.9
110	7,389	-1.48	-1.66	-1.90	-2.23	-1.92	-1.57	0.18	72.5
120	8,061	-1.63	-1.84	-2.03	-2.39	-2.09	-1.72	0.20	79.1
130	8,733	-1.80	-2.03	-2.16	-2.60	-2.30	-1.86	0.22	85.7
140	9,405	-1.93	-2.20	-2.27	-2.75	-2.46	-1.97	0.23	92.3
150	10,076	-1.88	-2.16	-2.25	-2.83	-2.46	-1.87	0.25	98.8
160	10,748	-1.90	-2.25	-2.31	-2.89	-2.57	-1.87	0.27	105.4
170	11,420	-1.96	-2.33	-2.37	-3.01	-2.65	-1.91	0.28	112.0
180	12,092	-2.03	-2.43	-2.44	-3.12	-2.76	-1.94	0.30	118.6
190	12,763	-2.14	-2.56	-2.53	-3.29	-2.91	-2.03	0.32	125.2
200	13,435	-2.28	-2.70	-2.64	-3.45	-3.06	-2.14	0.33	131.8

En esta primera zapata no se tomó el registro de los deformímetros después de la descarga, debido a que se removieron antes de la lectura respectiva, experiencia que se ajustó en los siguientes ensayos.



Figura 3.2. Curva carga versus deformación zapata 1

Los puntos 1, 3, 4 y 6 (cuatro extremos de la zapata) registraron asentamientos máximos de 2.28, 2.64, 3.45 y 2.14mm, respectivamente. El punto 2 que está en línea con los puntos 1, 3, 4 y 6 tuvo un asentamiento de 2.70mm, mientras que el punto 5 (el más cercano al punto de aplicación de la carga y alineado con el punto 4) mostró un asentamiento de 3.06mm. Lo anterior demuestra que la zapata efectivamente se comportó de manera flexible y se evidencia que en el centro hay más asentamiento que en los extremos. Además se aprecia una tendencia de inclinación hacia el punto 4.

Tabla 3. Deformaciones zapata 2

Unidad de carga	Carga (kg)	$\Delta 1$ (mm)	$\Delta 3$ (mm)	$\Delta 4$ (mm)	$\Delta 5$ (mm)	$\Delta 6$ (mm)	Esfuerzo en el suelo (N/mm ²)	Carga (kN)
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
3	202	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.0
20	1,344	-0.81	-0.84	-1.12	-0.92	-1.25	0.03	13.2
40	2,687	-1.51	-1.53	-2.00	-2.62	-1.99	0.07	26.4
60	4,031	-2.15	-2.15	-2.69	-3.31	-2.80	0.10	39.5
80	5,374	-2.53	-2.47	-3.20	-3.63	-3.11	0.13	52.7
100	6,718	-2.70	-2.42	-3.30	-3.79	-3.28	0.17	65.9
120	8,061	-3.35	-2.83	-3.87	-4.37	-3.78	0.20	79.1
140	9,405	-3.86	-2.96	-4.22	-4.70	-4.04	0.23	92.3
160	10,748	-4.22	-3.01	-4.44	-4.92	-4.25	0.27	105.4
180	12,092	-4.63	-3.07	-4.71	-5.19	-4.45	0.30	118.6
200	13,435	-5.03	-3.10	-4.96	-5.39	-4.70	0.33	131.8
220	14,779	-5.34	-3.15	-5.16	-5.62	-4.92	0.37	145.0
240	16,122	-5.67	-3.21	-5.43	-5.88	-5.14	0.40	158.2
260	17,466	-5.93	-3.34	-5.66	-6.20	-5.35	0.43	171.3
0	0	-2.50	-1.00	-2.77	-2.99	-0.85	0.00	0.0

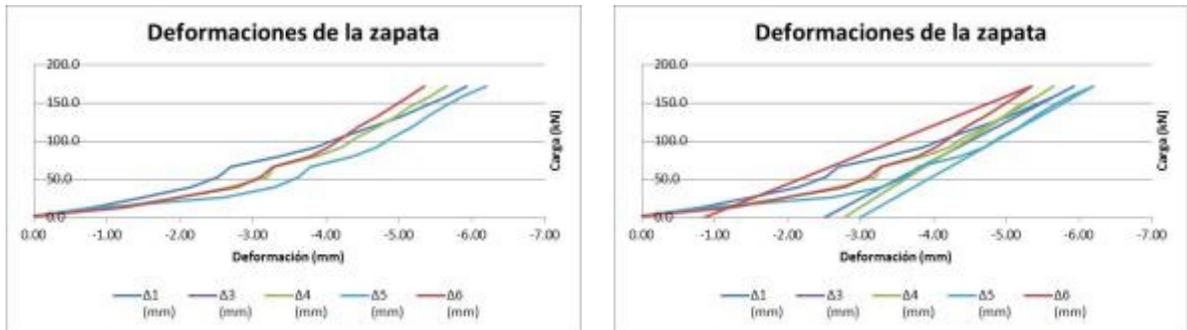


Figura 3.3. Curva carga versus deformación zapata 2 (con carga y con descarga)

En estas pruebas por decisión propia no se instrumentó el deformímetro 2, al considerar que el asentamiento en ese punto podía asimilarse con los deformímetros 1, 3, 4 y 6.

Los puntos 1, 3, 4 y 6 presentan asentamientos máximos de 5.93, 3.34, 5.66 y 5.35mm. Aunque no tan notable como en el ensayo de la zapata 1, se presenta más asentamiento hacia el punto 4 y una disminución en el punto 3. El punto 5 registra 6.20mm de asentamiento. Cuando se descarga el gato hidráulico los deformímetros marcan una huella promedio de 1.78mm en los cuatro puntos extremos de la zapata, confirmando comportamiento inelástico del suelo.

Tabla 4. Deformaciones zapata 3

Unidad de carga	Carga (kg)	$\Delta 1$ (mm)	$\Delta 3$ (mm)	$\Delta 4$ (mm)	$\Delta 5$ (mm)	$\Delta 6$ (mm)	Esfuerzo en el suelo (N/mm ²)	Carga (kN)
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
3	202	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.0
20	1,344	-1.90	-0.25	-1.29	-0.26	-0.97	0.03	13.2
40	2,687	-2.82	-2.10	-2.33	-1.20	-1.85	0.07	26.4
60	4,031	-3.33	-2.55	-2.83	-2.67	-2.34	0.10	39.5
80	5,374	-3.68	-2.89	-3.18	-2.99	-2.74	0.13	52.7
100	6,718	-4.05	-3.24	-3.53	-3.34	-3.09	0.17	65.9
120	8,061	-4.43	-3.46	-3.87	-3.64	-3.38	0.20	79.1
140	9,405	-4.81	-3.65	-4.19	-3.98	-3.64	0.23	92.3
160	10,748	-5.15	-3.85	-4.51	-4.28	-3.88	0.27	105.4
180	12,092	-5.45	-4.00	-4.77	-4.54	-4.09	0.30	118.6
200	13,435	-5.79	-4.18	-5.07	-4.82	-4.33	0.33	131.8
220	14,779	-6.08	-4.31	-5.39	-5.05	-4.54	0.37	145.0
240	16,122	-6.38	-4.49	-5.62	-5.35	-4.78	0.40	158.2
260	17,466	-6.78	-4.65	-5.91	-5.64	-5.07	0.43	171.3
280	18,809	-7.10	-4.83	-6.18	-5.94	-5.35	0.46	184.5
0	0	-3.31	-1.46	-2.28	-2.04	-2.47	0.00	0.0

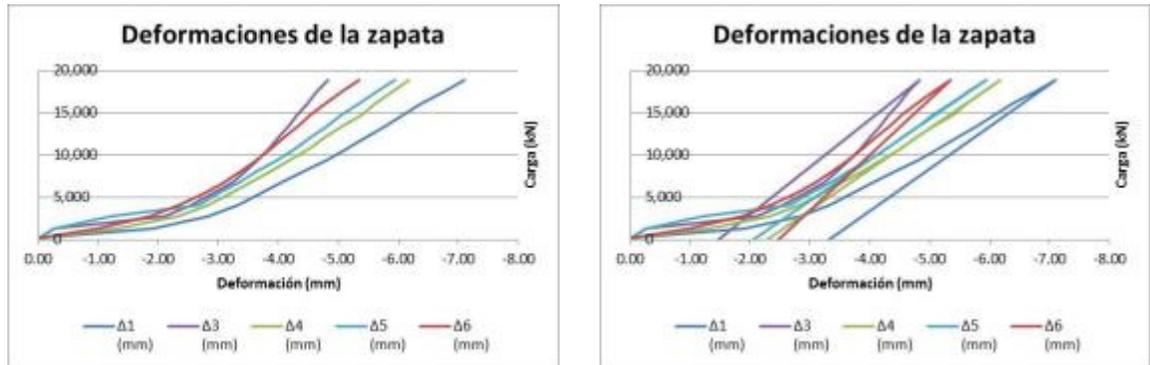


Figura 3.4. Curva carga versus deformación zapata 3 (con carga y con descarga)

En estas pruebas tampoco se instrumentó el deformímetro 2 por la misma razón explicada párrafos arriba.

Los puntos 1, 3, 4 y 6 arrojaron 7.10, 4.83, 6.18 y 5.35mm de asentamientos máximos. El punto 5 registra 5.94mm.

Con base en las tablas 2, 3 y 4, se genera la siguiente gráfica con el fin de consolidar y ver el esfuerzo vs deformación unitaria en las tres (3) zapatas simultáneamente. Se aclara que la deformación presentada en la gráfica es el promedio de los registros obtenido en las cuatro esquinas (puntos 1, 3, 4 y 6).

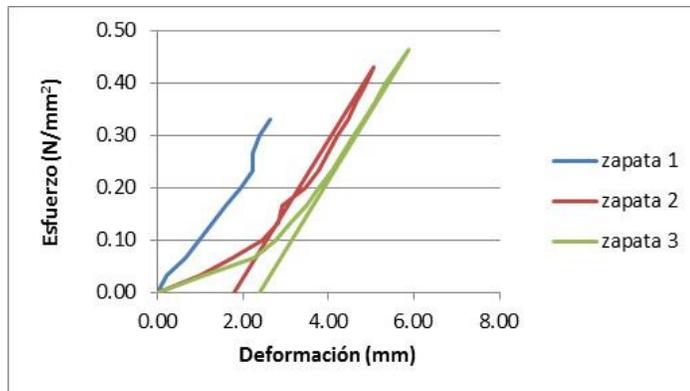


Figura 3.5. Curva esfuerzo-deformación de las tres zapatas

De la gráfica 3.5 se puede resaltar que aunque los ensayos de las tres (3) placas fueron en tiempos diferentes, y a pesar de que antes de cada ensayo se removían 20cm del suelo superficial y se volvía a compactar, en cada prueba

se registraron asentamientos cada vez de mayor magnitud para las mismas unidades de carga, lo que vislumbraba que el suelo por sus características propias se estaba degradando en cuanto a capacidad por asentamiento y presumiblemente el módulo de balasto estaba disminuyendo, con un comportamiento similar al de descarga y recarga del suelo planteado por Allotey y El Nagar.

La zapata 1 presentó una deformación máxima promedio de 2.63mm, la 2 de 5.07mm y la 3 de 5.87mm. Se observa que para la misma presión se presentan deformaciones o asentamientos mayores.

Tabla 5. Resumen asentamientos máximos registrados en las esquinas de las zapatas

Elemento	Asentamiento (mm)	Carga (kgf)
Zapata 1	3.45	13,435
Zapata 2	5.93	17,466
Zapata 3	7.10	18,809

Consolidando a partir de las tablas 5, 6 y 7, para la zapata 1 se aplicó una carga máxima de 131.8kN (13,435kg-f), para la zapata 2 se aplicó una carga máxima de 171.3kN (17,466kg-f) y para la zapata 3 se aplicó una carga máxima de 184.5kN (18,809kg-f), lo que equivale a un esfuerzo o reacción en el suelo de 3.4kg-f/cm², 4.4kg-f/cm² y 4.7kg-f/cm² respectivamente.

Tabla 6. Resumen datos experimentales zapatas

Elemento	Carga máxima aplicada en la prueba		Reacción máxima en la prueba	
	kN	Kgf	kN/m ²	kgf/ cm ²
Zapata 1	131.8	13,435	332.1	3.4
Zapata 2	171.3	17,466	431.7	4.4
Zapata 3	184.5	18,809	464.9	4.7

Con el fin de determinar valores teóricos claves y poder comparar dichos puntos con las pruebas experimentales, se trabajó con la relación Momento-Curvatura (diagrama M- Φ) y se calculan los valores teóricos de M_{cr} (primer agrietamiento), M_y (punto de fluencia del acero a tensión) y M_u (punto de rotura del concreto), por medio de hojas de cálculo basadas en la filosofía de la "resistencia última", para cada una de las zapatas.

El diagrama M- Φ es de gran importancia en el diseño de estructuras ante cargas estáticas y dinámicas, ya que visualiza fácilmente, que tan dúctil y resistente es un elemento. Para la construcción de las curvas M- Φ se tuvieron en cuenta las hipótesis de Park y Paulay (1971).

Tabla 7. Resumen de momentos estimados en las zapatas

Elemento	M en la carga máxima aplicada		M _{cr}		M _y		M _{rotura}	
	kN-m	kgf-cm	kN-m	kgf-cm	kN-m	kgf-cm	kN-m	kgf-cm
Zapata 1	7.35	74,923	6.72	68,515	10.39	105,895	10.75	109,604
Zapata 2	9.55	97,350	4.59	46,786	7.49	76,306	7.75	79,024
Zapata 3	12.34	125,790	6.28	63,991	9.44	96,188	9.80	99,855

La siguiente tabla estima las cargas teóricas que aplicadas a las zapatas generan los momentos descritos en la tabla anterior.

Tabla 8. Resumen de cargas en las zapatas

Elemento	Carga máxima aplicada en la prueba		Carga con la cual se obtiene M _{cr}		Carga con la cual se obtiene M _y		Carga con la cual se alcanza rotura	
	kN	Kgf	kN	kgf	kN	kgf	kN	kgf
Zapata 1	131.8	13,435	120.6	12,291	186.4	19,003	192.9	19,662
Zapata 2	171.3	17,466	82.4	8,395	134.4	13,699	139.1	14,175
Zapata 3	184.5	18,809	93.9	9,572	141.1	14,388	146.5	14,937

Como se puede deducir de las tablas 7 y 8 y de las pruebas experimentales realizadas a las tres zapatas, la zapata 1 no alcanzó a llegar a la falla por fluencia, no obstante las zapatas 2 y 3 si superaron el límite de fluencia y el de rotura.

Con base en las cargas estimadas en la tabla 7, se calculan las presiones aplicadas en el suelo en cada caso.

Tabla 9. Resumen de presiones en el suelo

Elemento	En la carga máxima aplicada en la prueba		En la carga con la cual se obtiene M _{cr}		En la carga con la cual se obtiene M _y		En la carga con la cual se alcanza rotura	
	kN/m ²	kgf/cm ²	kN/m ²	kgf/cm ²	kN/m ²	kgf/cm ²	kN/m ²	kgf/cm ²
Zapata 1	332.1	3.4	303.8	3.1	469.7	4.8	486.0	5.0
Zapata 2	431.7	4.4	210.4	2.1	338.6	3.5	350.4	3.6
Zapata 3	464.9	4.7	239.9	2.4	355.6	3.6	369.2	3.8

Las zapatas 2 y 3 empezaron a agrietarse para valores muy cercanos al de la carga externa, que según los cálculos, causaron los M_{cr} en cada una de ellas.

En los experimentos se registraron presiones máximas en el suelo con magnitud del 6% al 8% en comparación con la registrada en el ensayo de placa, 5.78MPa (56.7kg-f/cm²), además se observó comportamiento casi elástico del suelo hasta una deformación unitaria del 1%, y a partir de allí una deformación plástica, pero no se apreció el colapso del mismo confirmando que la falla del elemento estructural estudiado solo fue por servicio pero no por límite ultimo del mismo.

4. Análisis Matemático

4.1 Modelamiento en Ansys Workbench

Esta parte analítica del estudio se realizó por medio del programa ANSYS, el cual permite realizar modelamientos por medio de elementos finitos en diferentes áreas como la mecánica (estática/dinámica), estructural (lineal/no lineal), mecánica de fluidos, entre otros. Principalmente, ANSYS tiene dos entornos de trabajo que pueden ser utilizados tanto individualmente como en grupo. El primero denominado ANSYS Mechanical APDL el cual es conocido como el ANSYS clásico, por lo que la interacción entre usuario y software no es la ideal. El otro entorno de trabajo, recientemente desarrollado se denomina ANSYS Workbench. A pesar de esto ambos entornos tienen diferentes puntos fuertes.

Ventajas de ANSYS Workbench:

Asociación bidireccional con software CAD.

- Mejores herramientas para la simplificación de un problema.
- Métodos avanzados de mallado.
- Facilidad de uso
- Detecta y crea conexiones automáticamente

Ventajas de ANSYS Mechanical

- Control directo en el tipo de elementos, los nodos individuales y los elementos.
- Todas las opciones para los tipos de elemento.
- Personalización del APDL, macros, scripts.”

Igualmente ANSYS Workbench tiene una ventaja que aunque la implementación no es sencilla, es posible. A través de scripts y comandos, ANSYS Workbench es capaz de utilizar lo que está disponible en ANSYS Mechanical, por lo que al utilizar el entorno de Workbench aún se tienen la mayoría de las herramientas disponibles en ANSYS Mechanical.

Independientemente del entorno donde se trabaje, el proceso para obtener la solución a un problema es el mismo y se puede generalizar en tres etapas. Pre-procesamiento, solución y post-procesamiento.

En la etapa de pre-procesamiento se introducen los datos de entrada del problema, los cuales se usaran para obtener una solución. Estos datos de entrada son las

propiedades de los materiales, la geometría, el tipo de análisis, el mallado, las cargas y condiciones de contorno. La etapa de Solución consiste simplemente en ejecutar el conjunto de parámetros establecidos. Esta solución es automática y genera los resultados. La etapa del post-procesamiento es en la cual se muestran ya sea gráficamente o en tablas los resultados obtenidos.

Properties of Outline Row 3: Concreto 20 MPa			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	2400	kg m ⁻³
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus and Po...	
5	Young's Modulus	22431	MPa
6	Poisson's Ratio	0.18	
7	Bulk Modulus	1.1683E+10	Pa
8	Shear Modulus	9.5047E+09	Pa
9	Compressive Ultimate Strength	22.5	MPa

Figura 4.1. Propiedades del concreto

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	2000	kg m ⁻³
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus and Pois...	
5	Young's Modulus	124.77	MPa
6	Poisson's Ratio	0.35	
7	Bulk Modulus	1.3863E+08	Pa
8	Shear Modulus	4.6211E+07	Pa
9	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular	
10	Scale	1	
11	Offset	0	MPa

Figura 4.2. Propiedades del suelo

Con el fin de contemplar la no linealidad del suelo se utilizó un modelo plástico que relaciona la deformación después del límite elástico y los esfuerzos después del esfuerzo de fluencia del material, para ello se utilizó uno de los modelos matemáticos incorporados en ANSYS llamado "Multilinear Isotropic Hardening". Éste modelo se basa en caracterizar el comportamiento no lineal del suelo como un conjunto de elementos lineales con diferente limite elástico.

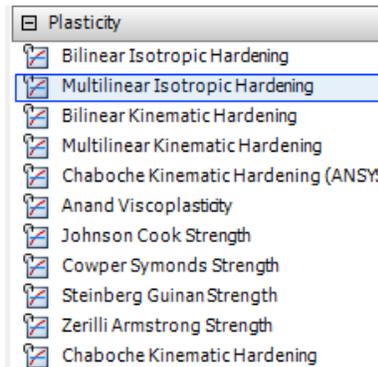


Figura 4.3. Modelos para simular la no-linealidad del suelo

Los contactos, materiales y geometría de los elementos que componen el modelado del problema fueron los mismos para cada una de las tres simulaciones con zapatas exceptuando el espesor de la misma.

Para la definición de los contactos en el modelado del problema se tuvieron en cuenta varios factores. Para el contacto entre el pistón y la zapata se llegó a que debido a la geometría del pistón, prácticamente toda la fuerza se aplica en el centro del elemento y se distribuye de forma axial y uniforme en el elemento, por lo que

entre el pistón y la zapata no hay forma de que se presente algún tipo de gap. Debido a lo anterior el contacto entre estas superficies fue simulado con “Bonded”.

Con respecto al contacto entre la zapata y el recebo se realizaron pruebas con contactos tipo “Bonded” y contactos tipo “Rough”. Inicialmente se planteó la posibilidad que debido a la diferencia de rigidez entre el suelo y el concreto, se hubiera presentado una separación de los elementos principalmente en las esquinas, sin embargo, teniendo en cuenta la altura del elemento de concreto y los resultados obtenidos en los deformímetros, **se concluyó que en ningún momento se presentó un vacío entre el suelo y la zapata**. Analizado el comportamiento de los elementos en el sistema, el tipo de contacto utilizado en esta superficie fue “Bonded” también.

Debido a que las deformaciones presentadas tanto en el recebo como en la zapata se querían evaluar de forma detallada, se le aplicó el control de mallado “Refinement” a la cara superior del recebo.

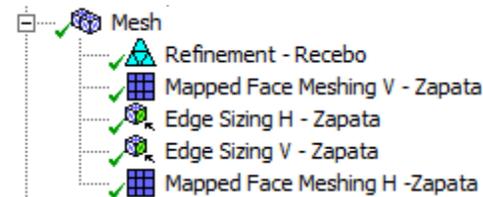


Figura 4.4. Herramienta que contiene los controles Mallado empleados en el análisis.

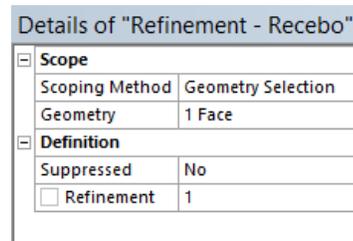


Figura 4.5. Detalles de la herramienta “Refinement”.

Para la discretización de la zapata se combinaron dos herramientas disponibles denominadas “Mapped Face Meshing” y “Edge Sizing”.

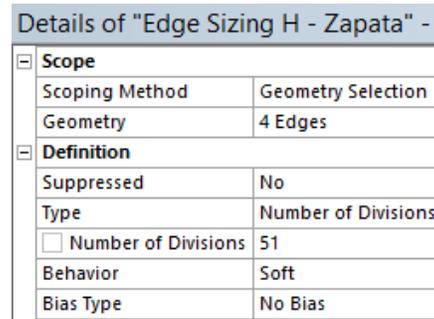
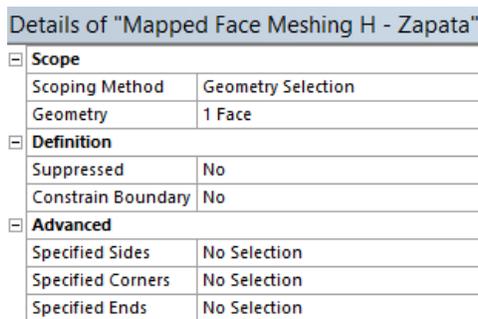


Figura 4.6. Detalles de las herramientas “Mapped Face Meshing” “Edge Sizing” aplicadas en la cara superior de la zapata.

Details of "Mapped Face Meshing V - Zapata"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Faces
[-] Definition	
Suppressed	No
Constrain Boundary	No
[-] Advanced	
Specified Sides	No Selection
Specified Corners	No Selection
Specified Ends	No Selection

Details of "Edge Sizing V - Zapata" - :	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Edges
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Number of Divisions
<input type="checkbox"/> Number of Divisions	4
Behavior	Soft
Bias Type	No Bias

Figura 4.7. Detalles de las herramientas "Mapped Face Meshing" "Edge Sizing" aplicadas en las caras laterales de la zapata.

Definidos los controles de mallado o discretización de los elementos, a continuación se presenta el mallado obtenido.

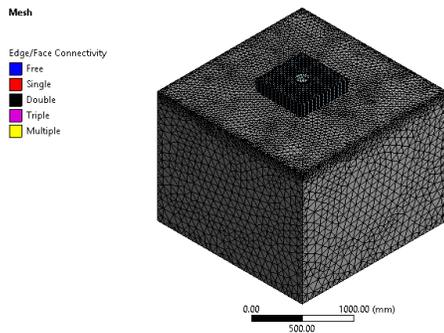


Figura 4.8. Discretización general del modelo de análisis.

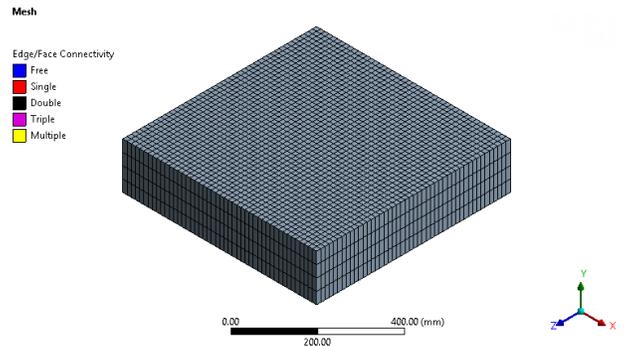


Figura 4.9. Discretización del elemento correspondiente a la zapata

4.2 Zapata 1 – 630mm x 630mm x 150mm

A continuación se presentan las condiciones de frontera para cada uno de los tiempos evaluados.

Tabla 10. Tiempos y cargas analizadas zapata 1

Tiempo	Carga aplicada en la prueba kN (kgf)	Observación
Tiempo 2	92.3 (9,405)	Punto donde el suelo deja de trabajar linealmente
Tiempo 3	131.8 (13,435)	Punto de carga máxima aplicada
Tiempo 4	186.4 (19,003)	Punto donde se alcanza M_y

Nota: los tiempos 3 y 4 son teóricos, ya que en la prueba experimental no se llegó a estos umbrales.

Ejecutado el análisis, el software guarda todo el análisis realizado y mediante el post-procesador o módulo denominado "Solution" se escoge entre las diferentes opciones los resultados que se desean observar. En este caso se desea ver los esfuerzos generados tanto en la zapata como en el recebo.

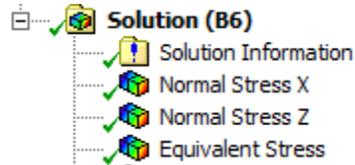


Figura 4.10. Resultados a obtener con ANSYS

Como se demostró, la zapata 1 no llegó a fluencia en la prueba experimental, por lo que basado en los cálculos de la curva $M-\Phi$, se estima el esfuerzo en la sección de concreto para la carga que hubiese generado el M_y , el cual se compara con el esfuerzo en la sección de concreto en el modelo de ANSYS para la misma carga. Es una manera indirecta de conocer si el momento calculado con ANSYS teniendo en cuenta la interacción suelo-estructura es mayor o menor respecto al estimado por el diseño tradicional, debido a que experimentalmente no se logró medir directamente los esfuerzos en el elemento de concreto ni la presión bajo el cimientto.

El esfuerzo en la sección de concreto, f_c , en la fluencia del acero es de 12.98 N/mm^2 y de ANSYS se tiene un valor estimado de 12.39 N/mm^2 , valores relativamente similares.

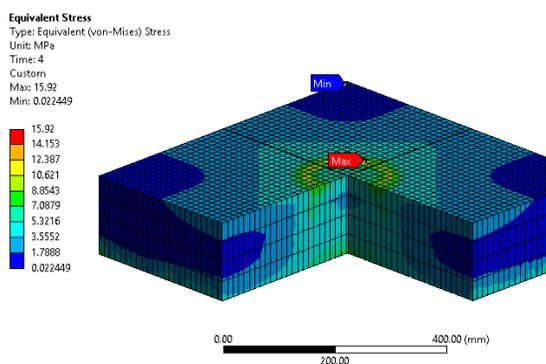


Figura 4.11. Esfuerzos en la zapata 1 en la fluencia

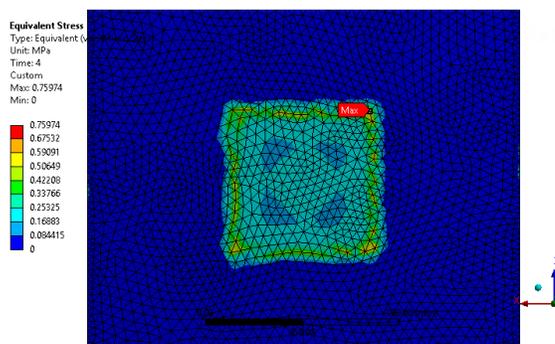


Figura 4.12. Presiones en el recebo

De igual manera la presión en el suelo en la carga con la cual se obtiene M_y es de 0.47 N/mm^2 y de ANSYS se tiene un valor promedio de 0.46 N/mm^2 , valores relativamente similares.

4.3 Zapata 2 - 630mm x 630mm x 120mm

Tabla 11. Tiempos y cargas analizadas zapata 2

Tiempo	Carga aplicada en la prueba kN (kgf)	Observación
Tiempo 2	92.3 (9,405)	Punto donde el suelo deja de trabajar linealmente
Tiempo 3	171.3 (17,466)	Punto de carga máxima aplicada
Tiempo 4	134.4 (13,699)	Punto donde se alcanza M_y

Como se demostró la zapata 2 si llego a fluencia en la prueba experimental, por lo que basado en los cálculos de la curva $M-\Phi$, estimamos el esfuerzo en la sección de concreto para la carga que genera el M_y , el cual se compara con el esfuerzo en la sección de concreto en el modelo de ANSYS para la misma carga. Es una manera indirecta de conocer si el momento calculado con ANSYS teniendo en cuenta la interacción suelo-estructura es mayor o menor respecto al estimado por el diseño

tradicional, debido a que experimentalmente no se logró medir directamente los esfuerzos en el elemento de concreto ni la presión bajo el cimiento.

El esfuerzo en el concreto, f_c , en la fluencia del acero es de 16.04 N/mm^2 y de ANSYS se tiene un valor estimado de 11.74 N/mm^2 , valores con diferencia del 36.6%.

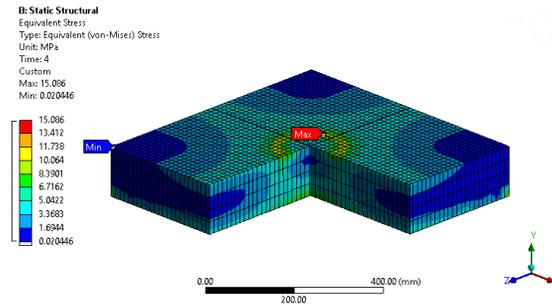


Figura 4.13. Esfuerzos en la zapata 2 en la fluencia

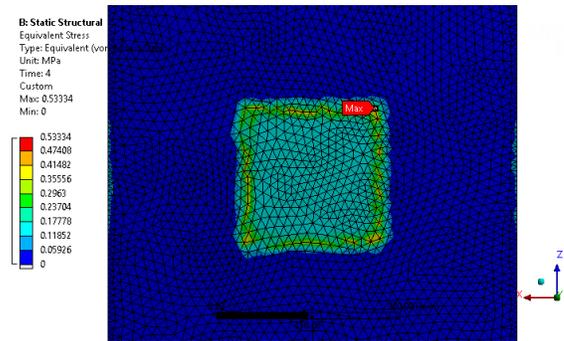


Figura 4.14. Presiones en el recebo

Así mismo la presión en el suelo en la carga con la cual se obtiene M_y es de 0.34 N/mm^2 y de ANSYS se tiene un valor promedio de 0.39 N/mm^2 , valores relativamente similares.

4.4 Zapata 3 - 630mm x 630mm x 140mm

A continuación se presentan las condiciones de frontera para cada uno de los tiempos evaluados.

Tabla 12. Tiempos y cargas analizadas zapata 3

Tiempo	Carga aplicada en la prueba kN (kgf)	Observación
Tiempo 2	52.7 (5,374)	Punto donde el suelo deja de trabajar linealmente
Tiempo 3	184.5 (18.809)	Punto de carga máxima aplicada
Tiempo 4	141.1 (14,388)	Punto donde se alcanza M_y

Como se demostró, la zapata 3 también llegó a fluencia en la prueba experimental, por lo que basado en los cálculos de la curva $M-\Phi$, estimamos el esfuerzo en la sección de concreto para la carga que genera el M_y , el cual se compara con el esfuerzo en la sección de concreto en el modelo de ANSYS para la misma carga. Es una manera indirecta de conocer si el momento calculado con ANSYS teniendo en cuenta la interacción suelo-estructura es mayor o menor respecto al estimado por el diseño tradicional, debido a que experimentalmente no se logró medir directamente los esfuerzos en el elemento de concreto ni la presión bajo el cimiento.

El esfuerzo en el concreto, f_c , en la fluencia del acero es de 14.13 N/mm^2 y de ANSYS se tiene un valor estimado de 10.10 N/mm^2 , presentando diferencia del 40%.

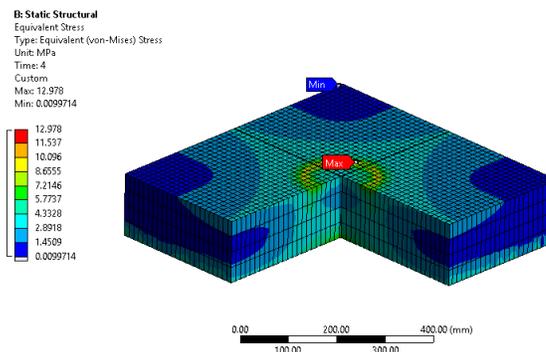


Figura 4.15. Esfuerzos en la zapata 3 en la fluencia

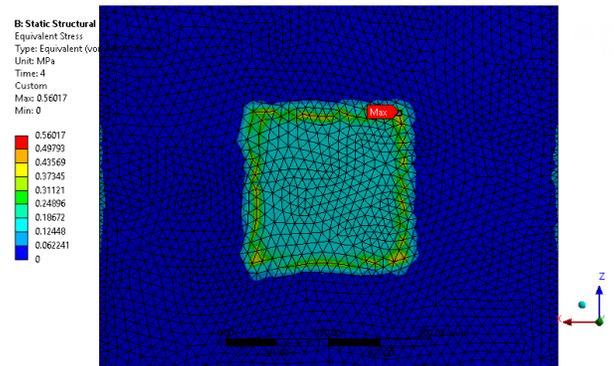


Figura 4.16. Presiones en el recebo

Así mismo de la Tabla 12 se revisa que la presión en el suelo en la carga con la cual se obtiene M_y es de 0.36 N/mm^2 y de ANSYS se tiene un valor estimado de 0.34 N/mm^2 , valores relativamente similares.

5. Conclusiones Y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Es importante incorporar en los análisis de fundaciones donde se vayan a presentar cargas cíclicas o en estructuras que por el efecto dinámico del sismo se presente descarga y recarga en los apoyos, la interacción suelo-estructura para determinar el esfuerzo que se transmite al suelo y las deformaciones esperadas, según el tipo de solución adoptado. En todos los modelos estudiados en este trabajo, experimental y analíticamente, el suelo siempre se comportó en forma no lineal, presentando degradación en cada ciclo de carga demostrado por las curvas esfuerzo-deformación de los modelos, donde el módulo de balasto fue reduciéndose después de cada prueba y de que siempre resultaron deformaciones permanentes al final.

- Tanto en los modelos en ANSYS como en los modelos experimentales, se comprobó que las placas de concreto sobre suelo granular se comportan como elementos flexibles, obteniéndose resultados en los esfuerzos del concreto muy similares en ambos modelos.
- En cuanto a asentamientos se apreció deformación radial y simétrica en los modelos de ANSYS y en los experimentales, pero en las magnitudes se registraron diferencias significativas, debido a que en los modelos de ANSYS se trabajó con la curva esfuerzo-deformación del ensayo de placa, dejando constante el módulo de balasto. Estos resultados permiten concluir que para el análisis del elemento estructural el software ANSYS es adecuado, pero se requiere definir cuidadosamente la curva esfuerzo-deformación del suelo en cada caso para la simulación no lineal del mismo.
- En los modelos analíticos realizados con ANSYS, se simuló la no linealidad del suelo a partir de la curva esfuerzo-deformación obtenida del ensayo de placa y alimentada en el módulo “Multilinear Isotropic Hardening”. Esto permitió conocer la matriz de esfuerzos bajo el cimiento, los asentamientos, la afectación del campo cercano de interacción suelo-estructura (bulbo de esfuerzos en el recebo bajo el cimiento), y la afectación en el campo lejano. Estos valores son fundamentales para el diseño de cimentaciones, utilidades únicas de estos tipos de software que dan herramientas al geotecnista y al estructural efectivas. Los modelos analizados eran sencillos y aun así demandaron hasta tres (3) horas, cada uno, cuando se corrían.
- A partir de las pruebas experimentales y apoyado en la teoría de vigas a flexión y la curva $M-\Phi$, se calcularon los momentos y esfuerzos en la sección de las zapatas sin considerar la interacción suelo-estructura, y se compararon con los esfuerzos en los modelos de ANSYS, concluyendo que para el tipo de fundación y suelo estudiado no es posible reducir los momentos flectores de diseño considerando la interacción suelo-estructura, es decir, que para el análisis y diseño de las zapatas es adecuado considerar reacción uniforme del suelo como si éste se comportara elásticamente.
- Debido a la diferencia de rigideces entre los elementos estructurales analizados por González (2015) y las zapatas en concreto de la presente investigación, debe ajustarse la teoría de interacción suelo-estructura para cada caso con los parámetros de cada uno de los experimentos, de tal manera que permita correlacionarlas, lo cual puede ser estudiado en la línea que desarrolla la Escuela.

5.2 Recomendaciones

- Incluir cargas cíclicas y registrar otros parámetros como degradación de la capacidad del suelo ante ese tipo de solicitaciones.

- Generar el modelo ANSYS incluyendo la no linealidad del concreto (multilineal), de la misma manera como se manejó para el suelo, y generar varios modelos con diferentes módulos de balasto para cada caso y revisar las condiciones de contacto concreto-suelo. Adicionalmente, en los experimentos homogenizar el material de relleno para garantizar mejor uniformidad.
- Se recomienda usar perfil metálico más rígido, para minimizar las deformaciones así como adicionar más masa en los apoyos de las columnas.
- Acorde con los asentamientos registrados en las esquinas de las zapatas, que presentaron diferentes tendencias en cada ensayo, se recomienda, además de centrar la zapata con el gato hidráulico, nivelar adecuadamente la superficie donde se colocaran las zapatas.
- Para una mejor aproximación a los parámetros del suelo, se recomienda realizar un ensayo triaxial para estimar con más precisión la curva esfuerzo-deformación del suelo y módulo de Young ya que son datos de entrada sensibles en el programa ANSYS y por consiguiente a los resultados.
- Podría medirse experimentalmente las presiones bajo las zapatas, por lo cual se recomienda instalar sensores de presión digitales, sincronizados con la celda de carga del gato hidráulico para obtener registros en línea.
- Se recomienda realizar un análisis para correlacionar los resultados de las diferentes investigaciones que se han realizado, como tema de un futuro trabajo de grado.

6. Bibliografía

- GONZÁLEZ SANDOVAL, Mary Yorley. Estudio de la interacción suelo-estructura en el rango elástico e inelástico de una zapata aislada mediante modelos físicos a escala y mediante elementos finitos. Trabajo de profundización de Maestría de la Escuela Colombiana de Ingeniería. 2015.
- LOPEZ DUQUE, Gustavo Alberto. Análisis de modelos físicos de zapatas aisladas sobre resortes para estudios de interacción suelo-estructura: una verificación según reglamento NSR-10. Proyecto final de Maestría Escuela Colombiana de Ingeniería. 2012.
- MUELAS RODRIGUEZ, Ángel. Manual de mecánica del suelo y cimentaciones. Uned. 2012.
- SEGURA FRANCO, Jorge Ignacio, Estructuras de concreto I. Séptima Edición. Universidad Nacional de Colombia. 2011.

- NSR-10. Ley 400 de 1997, Decreto 926 de 2010. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. 2010.
- FERNANDEZ CASTILLO, Rafael Ramón y TORRES, Carlos. Análisis de modelos físicos de zapatas aisladas sobre resortes para estudios de interacción suelo-estructura. Trabajo de grado de especialización Escuela Colombiana de Ingeniería. 2009.
- LILIANA ARENAS. Sistema de cimentación en placa-pilote, análisis de interacción suelo-estructura para suelos del valle de Aburra. Tesis Universidad Nacional. 2009.
- ANDREA JURADO Y EDWARD MARIN. Herramienta didáctica e interactiva para el cálculo del modelo hiperbólico y los parámetros de la teoría del estado crítico. Tesis Universidad De La Salle. 2009.
- PECK, HANSON AND THORNBURN. Ingeniería de cimentaciones. Publicado por Limusa. 2009.
- VIASÚS ARTEAGA, Carolina y LÓPEZ PALOMINO, Paulo Marcelo. Evaluación interacción suelo estructura mediante un modelo físico (zapatas aisladas). Trabajo de grado de especialización Escuela Colombiana de Ingeniería. 2008.
- MOAVENI, Saeed. Finite element analysis: theory and application with ANSYS. Publicado por Person Prentice Hall. 2008.
- NII ALLOTEY AND M. HESHAM EL NAGAR. Generalized dynamic Winkler model for nonlinear soil-structure in analysis. Canadá. 2008.
- NIETO, CASTAÑEDA Y VARGAS. Medición experimental del coeficiente de presión lateral de tierras en reposo, k_0 . Universidad Nacional, 2007.
- PULIDO, Juan Gabriel y SOACHA SANCHEZ, Alirio. Comportamiento de la superestructura considerando los efectos de interacción suelo-estructura. Trabajo de grado de especialización Escuela Colombiana de Ingeniería. 2007.
- VILLARREAL, Genner. Interacción sísmica suelo-estructura en edificaciones con zapatas aisladas. PERU. 2006.
- ZEA CONSTANTINO, Carmelino. RIVERA CONSTANTINO, Rigoberto. Notas sobre los fundamentos de la mecánica de suelos. Unam. 2004.
- M.I. CARMELINO ZEA CONSTANTINO Y DR. RIGOBERTO RIVERA. Notas sobre los fundamentos de la mecánica de suelos. UNAM. 2004
- DELGADO VARGAS, Manuel. Interacción suelo estructura. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Segunda reimpresión. 2002.
- NILSON, Arthur. Diseño de estructuras de concreto. Publicado por Mc Graw Hill. 2001.
- CALAVERA RUIZ, José. Cálculo de estructuras de cimentación. Publicado por Intemac. Cuarta edición. 2000.
- THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS. Soil – structure interaction. Publicado por Institution of Structural Engineers. 1989.
- MUELAS RODRIGUEZ, Ángel. Manual de mecánica del suelo y cimentaciones. Capítulo 4.
- SEQUERA D.A., SOLANO L.F., Tesis algoritmo para la calibración de modelos estructurales en elementos finitos de puentes usando ANSYS. Pontificia Universidad Javeriana.