

Diseño de un Elemento de Transición para la Modelación y Análisis de Interacción Suelo-Estructura en Condición Estática, en 3 Dimensiones y con el Método de Elementos Finitos

Cristhian Daniel Benitez Montaña

Director: Ricardo Salazar Ferro

Resumen

En este artículo se presenta una metodología de análisis de interacción suelo – estructura la cual consiste en el diseño de un elemento de transición que permita la modelación y análisis de la interacción entre el suelo y la estructura en condición estática, en 3 dimensiones, con el método de los elementos finitos para modelar el suelo y, en forma simultánea, el uso del análisis matricial para la simulación de la estructura. El caso de estudio corresponde a una columna en la cual se aplican fuerzas y momentos en el nodo superior, esta se analizó con la metodología propuesta y se logró determinar los desplazamientos y rotaciones que sufre la estructura como respuesta a las fuerzas aplicadas.

Palabras Clave

Elementos Finitos, Interacción Suelo - Estructura, Elemento de transición, tres dimensiones, modelación.

Introducción

En el campo del diseño geotécnico se ha vuelto popular el concepto de redundancia como alternativa para disminuir la incertidumbre y evitar la falla de estructuras por errores humanos. Este concepto presentado por Osterberg (1989) puede ser aplicado a la práctica general de la ingeniería, usando más de una metodología, herramienta o análisis, especialmente en la fase de diseño, buscando considerar alternativas a los distintos conceptos y asegurar que el riesgo de cada una de ellas este contemplado.

Teniendo en cuenta lo anterior, Moya et al (1999) refieren que en los últimos años se ha incrementado la necesidad de desarrollar sistemas más sofisticados que permitan el desarrollo de los diseños, y, por lo tanto, la interacción suelo-estructura. Como respuesta a esto, el método de los elementos finitos (MEF), modelo matemático que permite el análisis y diseño de las estructuras, ha tomado gran auge

Por otro lado, de acuerdo con Denicol, Davies y Krystallis (2020), una razón por la cual los megaproyectos están fallando, son el riesgo y la incertidumbre. Dentro de esta categoría se encuentra la complejidad de los proyectos por la gran cantidad de partes que intervienen y las relaciones entre sí.

Según lo anterior, la complejidad de los proyectos que se proponen ha llevado a utilizar hipótesis que no se asemejan a las condiciones reales de un proyecto, pero, que simplifican y facilitan los diferentes análisis y modelaciones en cada área de la ingeniería civil. Estas hipótesis, aunque buscan simular las condiciones reales de un proyecto, a veces introducen un alto grado de incertidumbre, el cual generalmente es mitigado utilizando factores de seguridad altos, resultando en diseños conservadores y costosos. En otras ocasiones, los diseños se basan en la experiencia del ingeniero que, aunque es valiosa e importante, puede dar como resultado diseños que son riesgosos y algunas veces sin garantías (Terzaghi & Peck, 1948).

Dentro de los diferentes retos que se presentan en la ingeniería civil se encuentran los análisis de interacción suelo – estructura. En este se reconoce la influencia de la estructura en el suelo y viceversa. Este reconocimiento permite identificar los posibles problemáticas y las respectivas soluciones. Sin embargo, es válido aclarar que las metodologías numéricas utilizadas por ambas áreas en los análisis son diferentes y no emulan una verdadera condición de interacción suelo – estructura.

Teniendo en cuenta que se han desarrollado diferentes metodologías para representar la interacción del suelo y la estructura, los siguientes párrafos se dividen en cuatro secciones: en la primera sección se mostrarán las diferentes metodologías utilizadas para la modelación del suelo y la estructura; en la segunda sección se mostrarán los diferentes elementos utilizados para modelar la interacción (unión) del suelo y la estructura. En la tercera sección, se presentarán los modelos más recientes utilizados para los análisis de interacción suelo- estructura. Por último, se presenta la metodología desarrollada para el modelamiento y análisis de la interacción suelo-estructura.

Para la modelación del suelo y la estructura se han desarrollado dos metodologías de análisis de los problemas de interacción suelo-estructura. El primero de ellos consiste en utilizar mallas en elementos finitos independientes para el suelo y la estructura que son conectados por una interfaz sin malla (Gong *et al*, 2019). Por otro lado, existen metodologías que no utilizan malla para simular el suelo y la estructura simultáneamente, algunas de estas se describen a continuación:

- Winkler en 1867 (citado en Delgado, 1998) constituyó un modelo mecánico que permite relacionar la respuesta del suelo en la solución de problemas de interacción suelo – estructura. En este, se supone que la carga aplicada que actúa en un punto entre la interface de la estructura y el suelo es una función lineal de la deflexión del terreno en el mismo punto de aplicación, cuya constante de proporcionalidad se denomina como k (módulo de reacción del terreno).
- Bojanowski (2014) simuló grandes deformaciones en problemas de interacción suelo-estructura, usando hidrodinámica de partículas alisadas (HPA) y el método de elementos finitos (MEF). La interfaz anterior se simula con elementos Goodman tradicionales y nodos HPA, los cuales deberían coincidir con los nodos MEF.

- Tang *et al* (2008) presento un método sin elementos automáticamente adaptable para analizar la respuesta de los suelos licuables ante un sismo. El método se basa en el método de Galerkin sin elementos y MEF para el análisis dinámico del suelo y la pila. Se muestra que el método propuesto proporciona un análisis sísmico preciso del suelo saturado que incluye los efectos de la licuefacción.
- Lu, Ding y Wu (2008) discuten la viabilidad de introducir el elemento Goodman para modelar discontinuidades geológicas con el método sin malla en toda su longitud, y señala los problemas existentes en algunos estudios actuales. En este estudio se presentó un elemento de interfaz 2D para modelar las discontinuidades en las rocas utilizando el método de elementos naturales (NEM).
- Lu, Wang y Chong (2005) utilizaron un modelo numérico acoplado para simular la respuesta de una estructura de concreto que se encuentra enterrada bajo una explosión subterránea. Se realizó una comparación del rendimiento de los esquemas de modelado 2D y 3D. La carga explosiva, el medio del suelo y la estructura se incorporan en un solo modelo (sistema). Se simuló una estructura con hidrodinámica de partículas alisadas (HPA). Por otro lado, utilizaron el método de elementos finitos (MEF) para modelar el suelo, con el fin de estudiar el comportamiento de una estructura en el suelo sometida a cargas explosivas.
- Estorff y Quan (2005) articularon el método de Galerkin sin elementos, el método de elementos finitos (FEM) y el método de elementos de contorno (BEM) para interacciones dinámicas suelo-estructura. Se plantea que el suelo y que la estructura son sistemas bidimensionales y discretizados por los nodos del método de Galerkin, mientras que los límites de la región del suelo analizado se modelan por FEM o BEM con el fin de colocar las condiciones de contorno de una manera fácil.
- Zhang, Lu y Wegner (2000) En función de los rasgos estructurales característicos de las rocas diaclasadas, se propone un modelo sin malla para el análisis mecánico de estructuras de rocas diaclasadas basadas en las interpolaciones de mínimos cuadrados móviles. En este modelo, una estructura de roca diaclasada se considera como un sistema de bloques de roca relativamente intactos conectados por juntas o planos de discontinuidad; estos bloques de roca están modelados por bloques anisotrópicos de forma general, mientras que estas uniones y planos de discontinuidad están modelados por interfaces. Al final diseñaron un modelo 2D para estructuras de rocas diaclasadas sin el uso de mallas.

De igual manera para modelar la interacción (unión) del suelo y la estructura se han propuesto diversos métodos como los que se describen a continuación. El primero de estos consiste en el uso de elementos de espesor cero o finito que desarrollaron Goodman, Taylor y Brekke (1968). Seguido a esto, se presenta el uso de elementos finitos continuos delgados como resultado de la superposición de los elementos de espesor cero o finito nombrados anteriormente y puestos a lado y lado de la superficie de la interfaz, esto fue propuesto por Desai en 1984 (citado en Gong *et al*, 2019). El tercer modelo es el modelo de contacto el

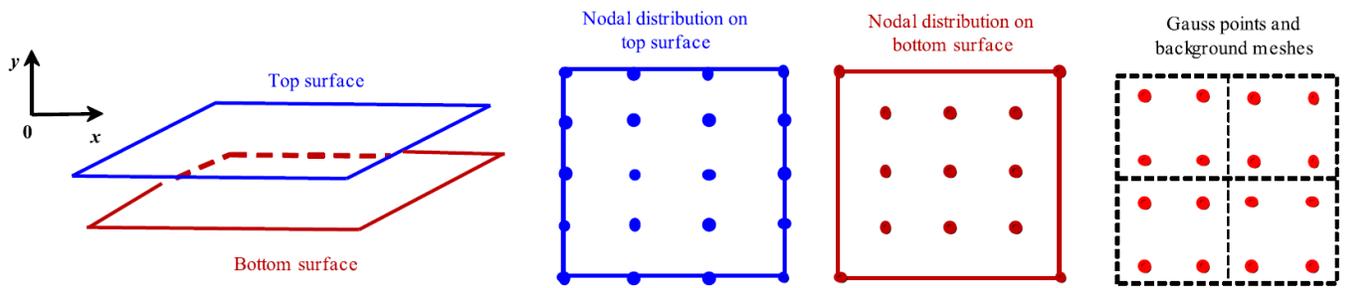


Figura 3 Interfaz típica sin malla con distribución nodal flexible (Gong et al, 2019)

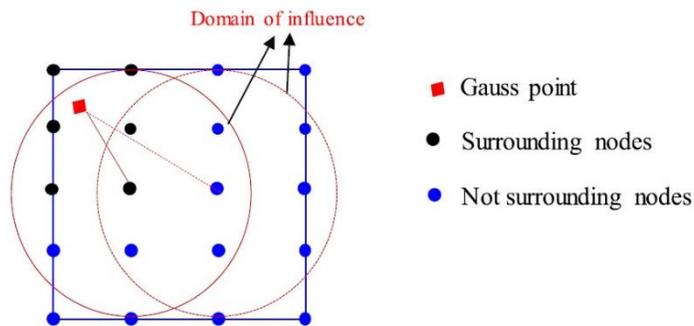


Figura 4: Los nodos que rodean un punto de Gauss en la parte superior (Gong et al, 2019)

La interfaz sin malla se basa en el método del punto radial. La matriz de deformación y el desplazamiento relativo de los puntos de Gauss, los cuales pueden ser representados por los nodos circundantes, permitiendo una distribución nodal que es flexible dentro de la interfaz. Cada punto de Gauss representa una “matriz de sub-rigidez” con las cuales se puede obtener una matriz de rigidez general que representa la interfaz 3D sin malla.

Un tercer modelo que ha sido presentado consiste en una estrategia de acoplamiento entre el método de elementos de contorno y el método de elementos finitos, con el fin de crear un código computacional que permita el análisis de un elemento tipo frame en dos dimensiones no lineales unidos a un modelo de suelo estratificado, para este fin se modeló el suelo con el método de elementos de contorno. El acoplamiento numérico se logró con una estrategia algebraica que permite extraer la matriz de rigidez del suelo y las fuerzas de contacto que son introducidas en la matriz Hessiana del elemento tipo frame y el vector de fuerza interna (Queiroz & Brevez, 2012).

Con lo expuesto anteriormente se ha evidenciado que los análisis de interacción suelo-estructura son una problemática a la cual se le ha estado prestando atención en los últimos años, promoviendo la investigación con el fin de crear nuevas metodologías que permitan optimizar estos análisis. Como respuesta a esto, en el presente artículo se presenta la metodología desarrollada en la cual se dimensiono un elemento de transición que permite la modelación y análisis de interacción suelo-estructura en condición estática, en 3 dimensiones, con el método de elementos finitos para modelar el suelo y el uso de análisis

matricial para la simulación de la estructura. Este elemento no considerara la variación de los desplazamientos en el tiempo.

El elemento de transición consiste en un elemento finito hexaédrico, muy rígido, dimensionado en función de las 6 variables (3 fuerzas y 3 momentos) presentes en el nodo inferior de una columna. Se selecciono como elemento estructural la columna debido a que este es el elemento que transmite principalmente las cargas ejercidas por la estructura al suelo (Ver Figura 5).

Para dimensionar el elemento de transición, se ubican las 3 fuerzas (F_x , F_y , F_z) en tres de los cuatro nodos superiores del elemento, para determinar las dimensiones del elemento (L_1 , L_2 y L_3) se calculan los momentos generados por las fuerzas en los nodos superiores al centro del elemento de transición, de esta manera, asumiendo que las fuerzas y los momentos en el nodo inferior de la columna son variables conocidas, se deja así las dimensiones del elemento de transición (L_1 , L_2 y L_3) como incógnitas. Finalmente, se procede a solucionar un sistema de ecuaciones de 3 ecuaciones con 3 incógnitas.

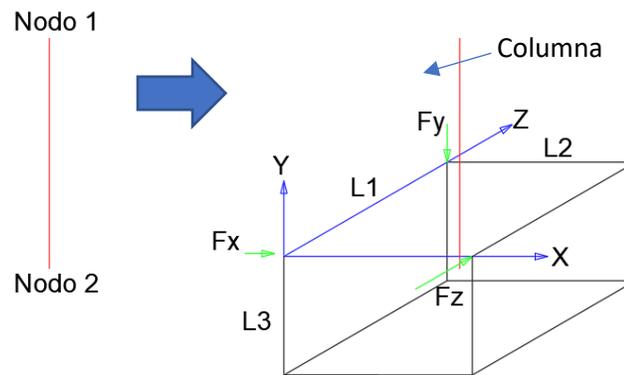


Figura 5 Alternativa 3 de elemento de acople

Como se mencionó anteriormente, a continuación, se presentan los momentos generados por las fuerzas aplicadas en los nodos superiores del elemento. Los momentos se calcularon al centro del elemento de transición:

$$M_x = F_y * (L_1/2) - F_z * (L_3/2)$$

$$M_y = F_x * (L_1/2) + F_z * (L_2/2)$$

$$M_z = F_y * (L_2/2) - F_x * (L_3/2)$$

Teniendo el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas planteado, se procede a despejar L_1 , L_2 y L_3 teniendo:

$$L_1 = - \frac{-F_x M_x - F_y M_y + F_z M_z}{F_x F_y}$$

$$L2 = - \frac{FxMx - FyMy - FzMz}{FyFz}$$

$$L3 = - \frac{FxMx - FyMy + FzMz}{Fx Fz}$$

Determinando las dimensiones del elemento de transición nos permite aplicar las fuerzas reales que llegan a la columna y representar los momentos en función de la geometría del elemento. Este planteamiento permite convertir las cargas y momentos del nodo inferior de la columna en un elemento finito.

Resultados

Con el fin de desarrollar la metodología propuesta y el elemento de transición dimensionado, el caso de estudio corresponde a una columna cuadrada (0.5 x 0.5m) de 3m de alto conectada a una zapata en concreto a través del elemento de transición, por último, la zapata se soporta sobre un mismo suelo homogéneo compuesto por una malla de 188 elementos finitos. En la parte superior de la columna se aplican tres fuerzas (Fx, Fy, Fz) y tres momentos (Mx, My, Mz), lo anterior teniendo en cuenta que el modelo se analiza en tres dimensiones (ver Figura 6).

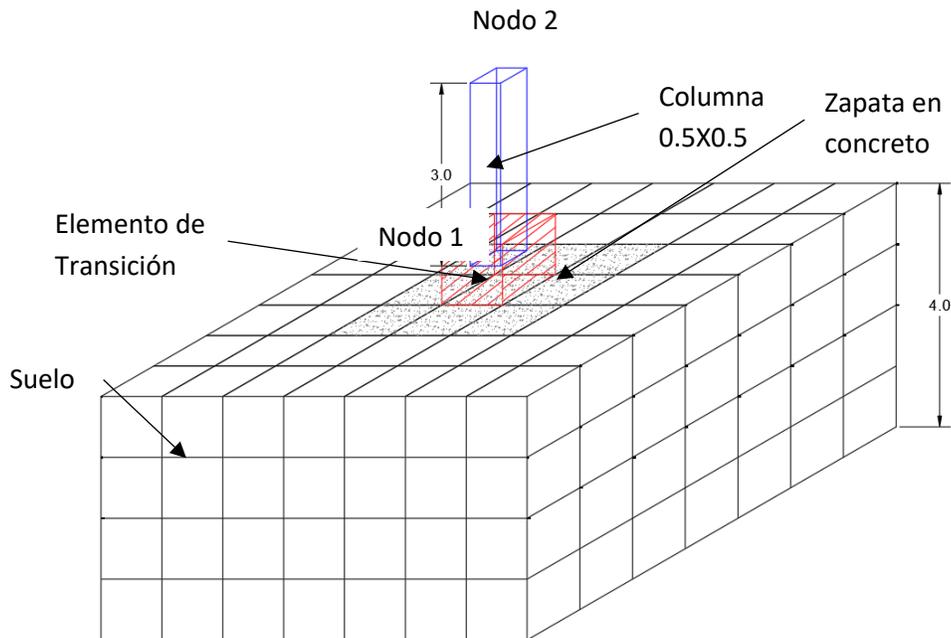


Figura 6 Caso de estudio

Para el caso de estudio descrito anteriormente se contemplaron cuatro diferentes modelos, en los cuales se mantuvieron características como propiedades de los materiales (Concreto, Suelo y Elemento de transición) y dimensiones de la columna. Como variables,

se manejaron las fuerzas y momentos aplicados en la columna, el elemento de transición (dimensionado en función de las fuerzas resultantes del análisis matricial) y, por último, la dimensión de la malla que representa el suelo y la zapata, la cual varía en función de las dimensiones del elemento de transición.

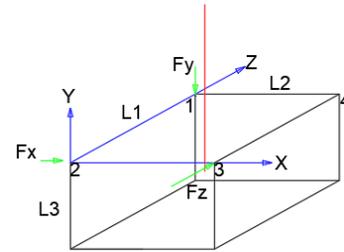
Las propiedades de los materiales que se utilizaron en los análisis se describen en la Tabla 1, adicionalmente, las diferentes combinaciones de carga y dimensiones iniciales del elemento de transición se describen en la Tabla 2.

Tabla 1 Propiedades de los materiales para los análisis

Material	Módulo de Elasticidad (ton/m ²)	Relación de Poisson
Suelo	2000	0,35
Concreto	2000000	0,30
Elemento de Transición	2000000000	0,30

Tabla 2 Modelos analizados

	Modelo	1	2	3	4
Fuerzas	Fuerza X (Ton)	10	-15	30	20
	Fuerza Y (Ton)	80	150	100	115
	Fuerza Z (Ton)	-30	-15	-45	-60
	Momento X (Ton*m)	100	75	105	130
	Momento Y (Ton*m)	-10	-10	-10	-10
	Momento Z (Ton*m)	25	35	50	30
Dimensiones Iniciales Elemento Transición	L1 (m)	1,2	0,9	1,5	1,4
	L2 (m)	1,1	0,4	1,4	0,8
	L3 (m)	3,5	0,7	1,4	1,6



Para los modelos propuestos se utilizó un sistema coordenado global en el cual el origen (0,0,0) se encuentra ubicado en el nodo 5. Adicionalmente, en la Figura 7 se muestra una guía de la numeración de los nodos (color negro) y elementos (color azul) utilizado en los análisis.

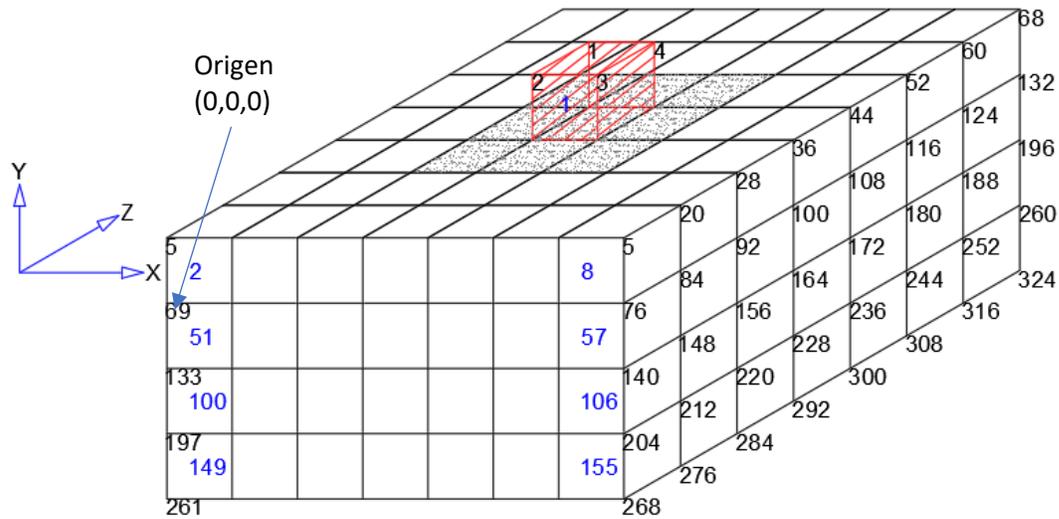


Figura 7 Sistema coordenado y numeración de nodos

Teniendo en cuenta los análisis planteados, se propone realizar una comprobación de los análisis y resultados obtenidos con el elemento de transición diseñado, en cada uno de los 4 modelos a analizar. Para realizar esta comprobación, se prevé generar una malla en elementos finitos en la cual se contemple la columna, la cimentación y el suelo.

Esta malla se compondrá de 186 nodos y 88 elementos hexaédricos, en la Figura 8 se presenta la malla generada para realizar el análisis de comprobación.

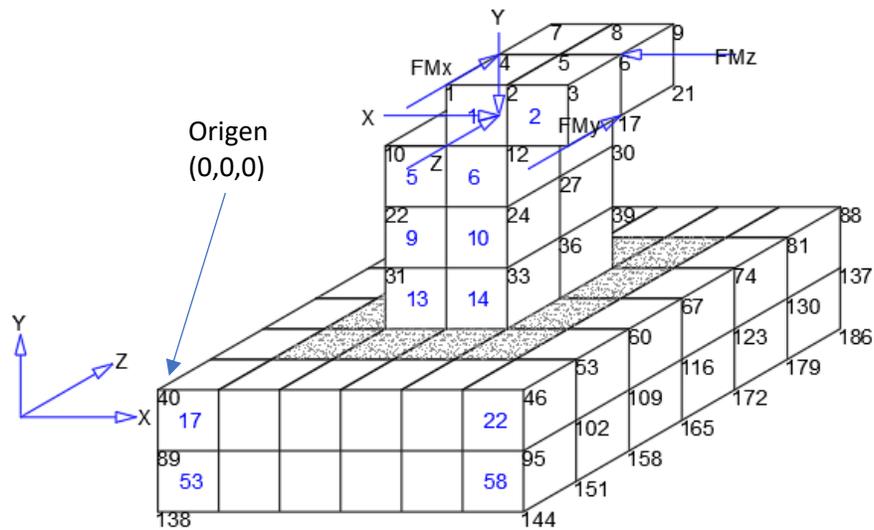


Figura 8 Sistema coordenado y numeración de nodos modelo de comprobación

Luego de realizar el análisis de la malla de elementos finitos se tomarán los resultados de desplazamientos obtenidos en los nodos 56, 57, 58, 63, 64, 65, 70, 71 y 72, se determinará el promedio de los desplazamientos en cada dirección y se comparará con los resultados obtenidos con el elemento de transición diseñado.

Como resultado de los modelos analizados, se presentan el análisis matricial realizado en la columna, a partir de la ecuación básica de un elemento pórtico espacial - que fue adaptada de Uribe (2002) - y por último se presentan secciones transversales en las que se evidencia los desplazamientos de los nodos en el suelo y la zapata, además de los desplazamientos en el nodo inferior de la columna.

Como vemos en la Figura 9, en las secciones transversales se colocaron 2 secciones perpendiculares al eje Y (niveles 0 y -2) y un corte perpendicular al eje z (corte A-A).

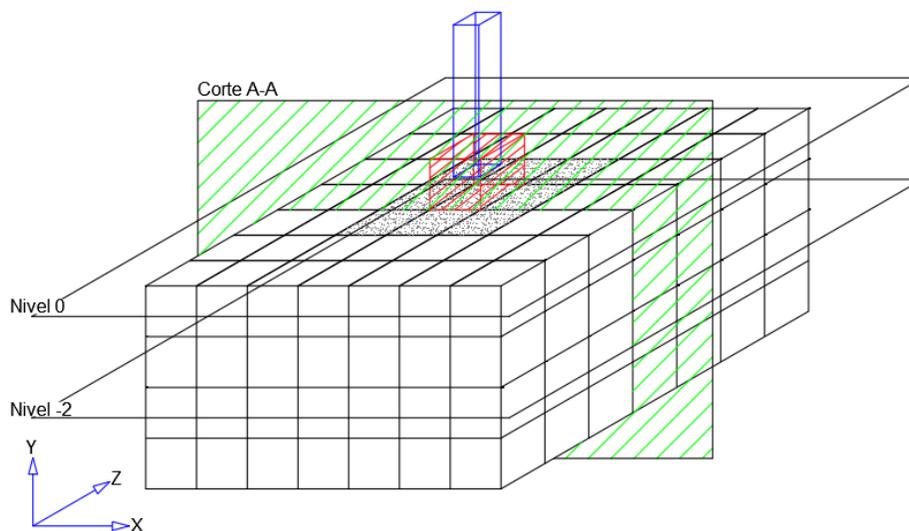


Figura 9 Secciones transversales de análisis

Finalmente, a continuación, se presenta el análisis realizado para cada uno de los modelos contemplados.

Modelo 1

Para este modelo se dimensionó un elemento de transición inicial de 1.2mx1.1mx3.5m, las fuerzas y momentos aplicadas en el nodo superior de la columna corresponden a $F_x = -10$ Ton, $F_y = -80$ Ton, $F_z = 30$ Ton, $M_x = -10$ Ton*m, $M_y = 10$ Ton*m y $M_z = 5$ Ton*m.

Al realizar el análisis, se evidencia la respuesta del suelo debido a las fuerzas aplicadas por la columna, en la Figura 10 se muestra las deformaciones y giros resultantes en la columna resultados en color verde.

		u2	v2	w2	θx2	θy2	θz2	u1	v1	w1	θx1	θy1	θz1		
X2	-10	4630	0	0	0	0	-6944	-4630	0	0	0	0	-6944	-8.9E-02	u2
Y2	-80	0	166667	0	0	0	0	0	-166667	0	0	0	0	1.2E-04	v2
Z2	30	0	0	4630	6944	0	0	0	0	-4630	6944	0	0	-6.3E-02	w2
M _{x2}	-10	0	0	6944	13889	0	0	0	0	-6944	6944	0	0	1.1E-02	θx2
M _{y2}	10	0	0	0	0	2445	0	0	0	0	0	-2445	0	-2.3E-02	θy2
M _{z2}	5	-6944	0	0	0	0	13889	6944	0	0	0	0	6944	-3.0E-02	θz2
=													X		
X1	10.00	-4630	0	0	0	0	6944	4630	0	0	0	0	6944	1.9E-05	u1
Y1	80.00	0	-166667	0	0	0	0	0	166667	0	0	0	0	6.0E-04	v1
Z1	-30.00	0	0	-4630	-6944	0	0	0	0	4630	-6944	0	0	-1.3E-02	w1
M _{x1}	100.00	0	0	6944	6944	0	0	0	0	-6944	13889	0	0	2.7E-02	θx1
M _{y1}	-10.00	0	0	0	0	-2445	0	0	0	0	0	2445	0	-2.7E-02	θy1
M _{z1}	25.00	-6944	0	0	0	0	6944	6944	0	0	0	0	13889	-2.7E-02	θz1

Figura 10 Resultado de análisis en la columna – Modelo 1

En la Figura 11 se evidencia gráficamente los desplazamientos en la columna, en el eje x se estima la deformación de 9cm en el nodo superior y en el nodo inferior en 0.012 mm.

Por otro lado, en el suelo se identifican las deformaciones resultantes en los nodos de la malla que representan el suelo y la placa de cimentación, para esto se realizaron 3 cortes en los que se puede evidenciar el desplazamiento y rotación de la zapata (Ver Figura 14).

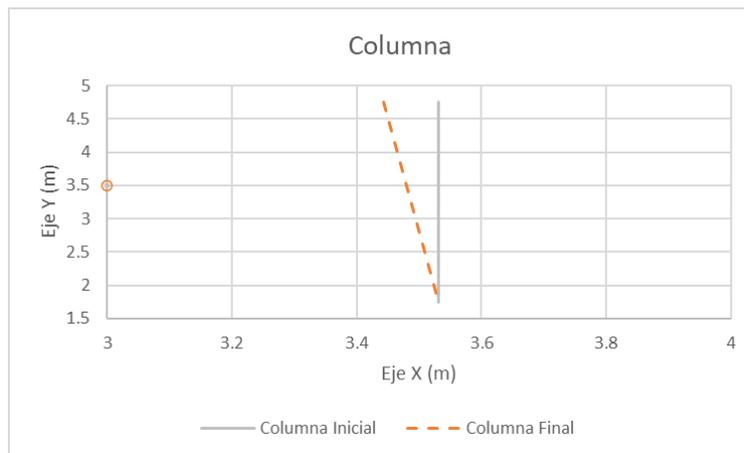


Figura 11 Modelo Columna – Modelo 1

En la Figura 12 se evidencia una deformación vertical e irregular debajo de la placa de cimentación, en este caso la deformación no es uniforme debido a la influencia de las fuerzas y los momentos en las tres direcciones en la cimentación.

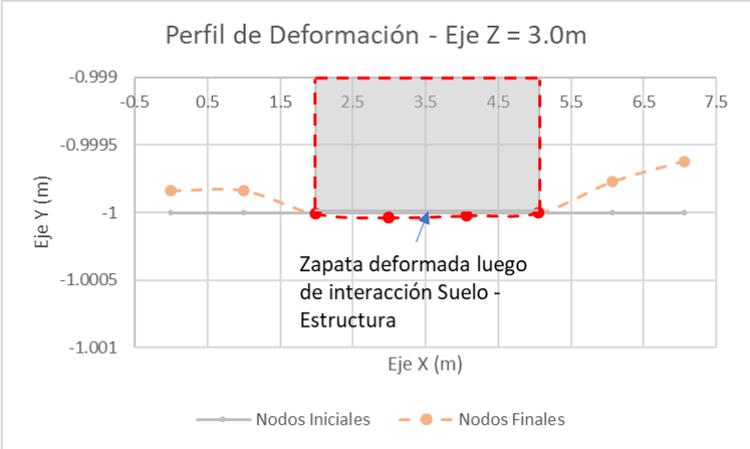


Figura 12 Perfil de deformación bajo la zapata – Modelo 1

En la Figura 13 se puede ver la rotación y desplazamientos resultantes en la zapata donde se evidencia la influencia de la columna en la cimentación.

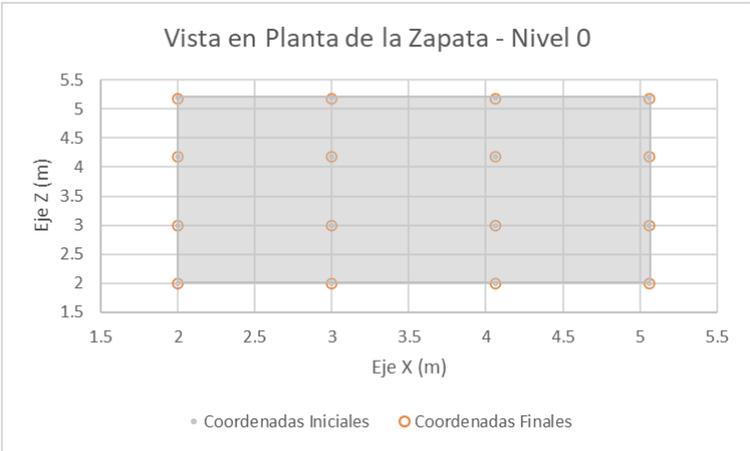


Figura 13 Vista en planta de la zapata – Modelo 1

Luego de este análisis se realizó la comprobación de los resultados con la malla en elementos finitos que representa todo el sistema (columna, cimentación y suelo). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Resultados modelo de comprobación – Modelo 1

RESUMEN DESPLAZAMIENTOS					
U56	2.44E-06	V56	3.34E-05	W56	1.86E-03
U57	8.83E-07	V57	2.73E-05	W57	1.86E-03
U58	-9.25E-07	V58	2.12E-05	W58	1.85E-03
U63	6.26E-06	V63	-8.70E-06	W63	1.86E-03
U64	6.13E-06	V64	-1.07E-05	W64	1.86E-03
U65	6.29E-06	V65	-1.29E-05	W65	1.86E-03
U70	1.34E-05	V70	-6.69E-05	W70	1.86E-03
U71	1.49E-05	V71	-6.59E-05	W71	1.86E-03
U72	1.59E-05	V72	-6.10E-05	W72	1.86E-03
PROMEDIOS					
Up	7.26E-06	Vp	-1.60E-05	Wp	1.86E-03
θxp	-2.55E-02	θyp	1.25E-02	θzp	2.27E-02

En la Tabla 4 se evidencia la comparación entre los resultados obtenidos en el análisis matricial que se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y los resultados obtenidos del modelo de verificación que se muestran en la Tabla 3 se puede comprobar que, aunque los resultados no son los mismos, los valores obtenidos están en el mismo orden de magnitud.

Tabla 4 Comparación resultados de análisis del Modelo 1

RESUMEN DESPLAZAMIENTOS POR AMBAS METODOLOGÍAS			
Elemento de transición Propuesto		Modelado en Malla de Elementos Finitos	
up	1.87E-05	up	7.26E-06
vp	6.05E-04	vp	-1.60E-05
Wp	-1.31E-02	Wp	1.86E-03
θxp	2.69E-02	θxp	-2.55E-02
θyp	-2.74E-02	θyp	1.25E-02
θzp	-2.74E-02	θzp	2.27E-02

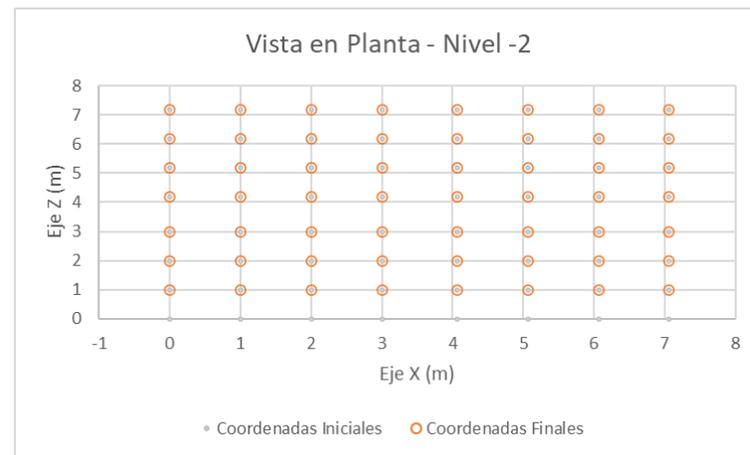
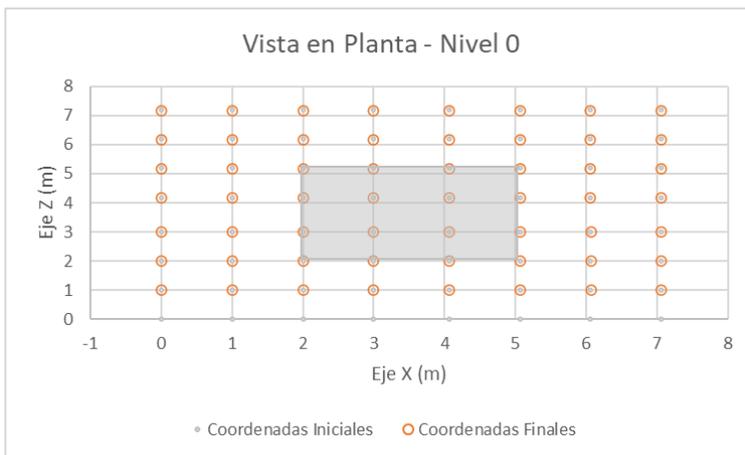
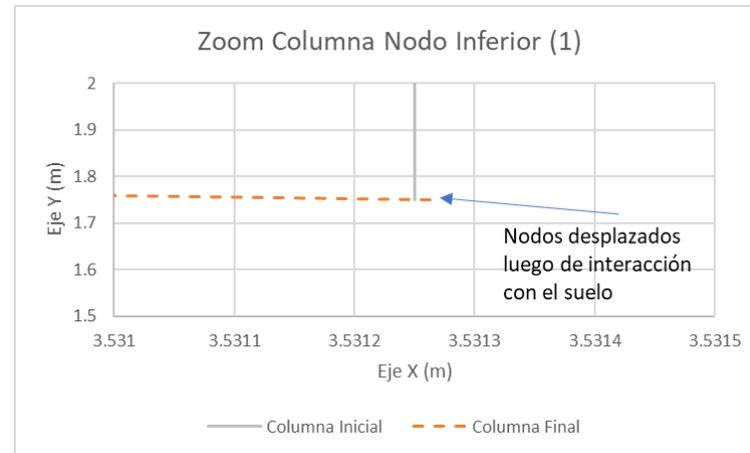
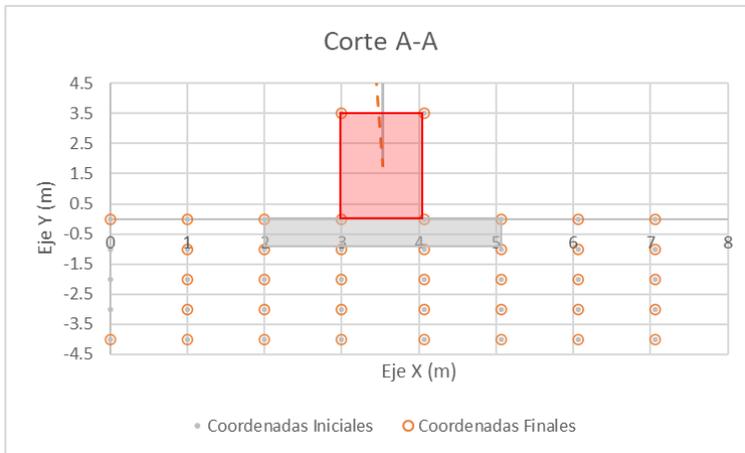


Figura 14 Secciones de análisis del suelo – Modelo 1

Modelo 2

En el segundo modelo las fuerzas y momentos aplicados corresponden a $F_x = 15 \text{ Ton}$, $F_y = -150 \text{ Ton}$, $F_z = 15 \text{ Ton}$, $M_x = -30 \text{ Ton}\cdot\text{m}$, $M_y = 10 \text{ Ton}\cdot\text{m}$ y $M_z = -80 \text{ Ton}\cdot\text{m}$. Con estas fuerzas y momentos, las dimensiones del elemento de transición corresponden a $0.9\text{m}\cdot 0.4\text{m}\cdot 0.7\text{m}$.

Como se ve en la Figura 15, la columna presenta deformaciones en la base que corresponde a la interacción de la estructura con el suelo. En la Figura 16 se muestra la condición inicial de la columna y la resultante luego de la aplicación de las fuerzas en el nodo superior de la columna, se estiman deformaciones en el eje x de 10cm en el nodo superior y de 0.03mm en el nodo inferior de la columna.

		u2	v2	w2	θ_{x2}	θ_{y2}	θ_{z2}	u1	v1	w1	θ_{x1}	θ_{y1}	θ_{z1}		
X2	15	4630	0	0	0	0	-6944	-4630	0	0	0	0	-6944	-1.0E-01	u2
Y2	-150	0	166667	0	0	0	0	0	-166667	0	0	0	0	-5.4E-04	v2
Z2	15	0	0	4630	6944	0	0	0	0	-4630	6944	0	0	9.8E-02	w2
M _{x2}	-30	0	0	6944	13889	0	0	0	0	-6944	6944	0	0	-4.1E-02	θ_{x2}
M _{y2}	10	0	0	0	0	2445	0	0	0	0	0	-2445	0	3.1E-02	θ_{y2}
M _{z2}	-80	-6944	0	0	0	0	13889	6944	0	0	0	0	6944	-4.4E-02	θ_{z2}
	=													X	
X1	-15.00	-4630	0	0	0	0	6944	4630	0	0	0	0	6944	-2.7E-05	u1
Y1	150.00	0	-166667	0	0	0	0	0	166667	0	0	0	0	3.6E-04	v1
Z1	-15.00	0	0	-4630	-6944	0	0	0	0	4630	-6944	0	0	-6.2E-03	w1
M _{x1}	75.00	0	0	6944	6944	0	0	0	0	-6944	13889	0	0	-2.6E-02	θ_{x1}
M _{y1}	-10.00	0	0	0	0	-2445	0	0	0	0	0	2445	0	2.7E-02	θ_{y1}
M _{z1}	35.00	-6944	0	0	0	0	6944	6944	0	0	0	0	13889	-2.7E-02	θ_{z1}

Figura 15 Resultado de análisis en la columna – Modelo 2

Adicionalmente, se realizó un análisis de los elementos finitos que representan el suelo y la cimentación, como se ve en la Figura 19 se evidencia deformación y rotación debido a la interacción con la columna.

Específicamente en la Figura 17 y la Figura 18 se muestra el perfil de deformación bajo la columna y el desplazamiento en planta, en este caso se evidencia la deformación irregular en la base de la cimentación, adicionalmente, el desplazamiento de la cimentación entre los ejes X y Y.

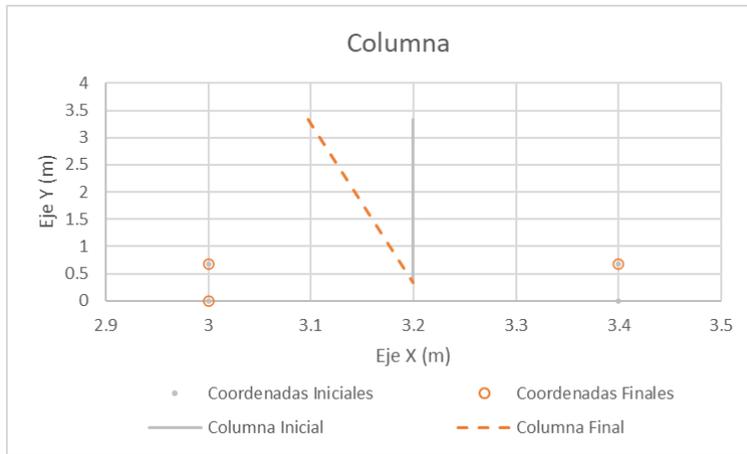


Figura 16 Modelo Columna – Modelo 2

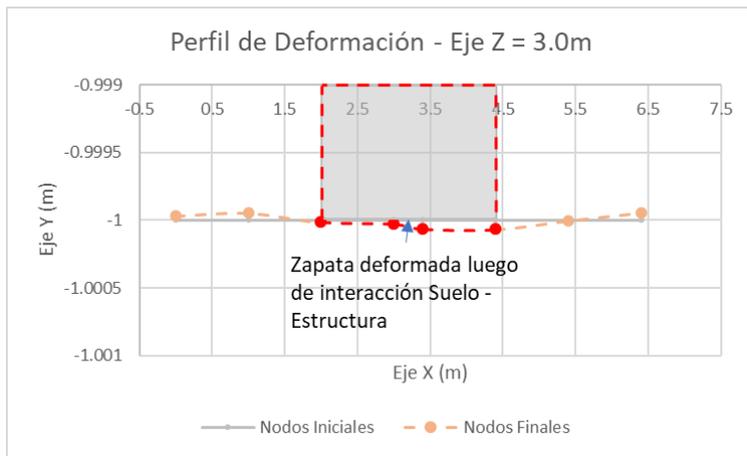


Figura 17 Perfil de deformación bajo la zapata – Modelo 2

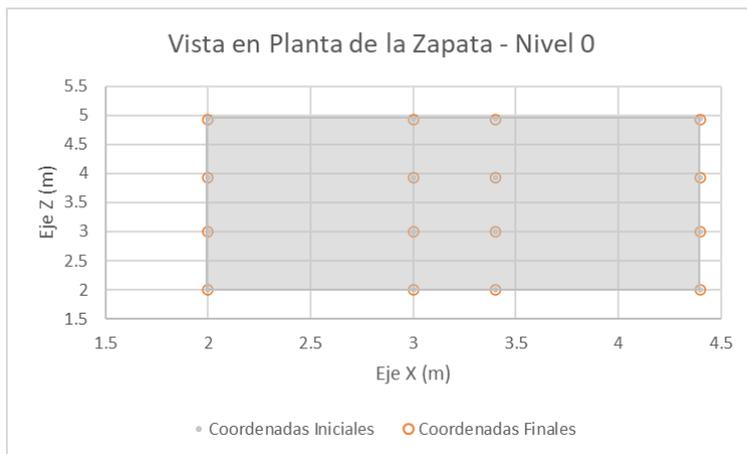
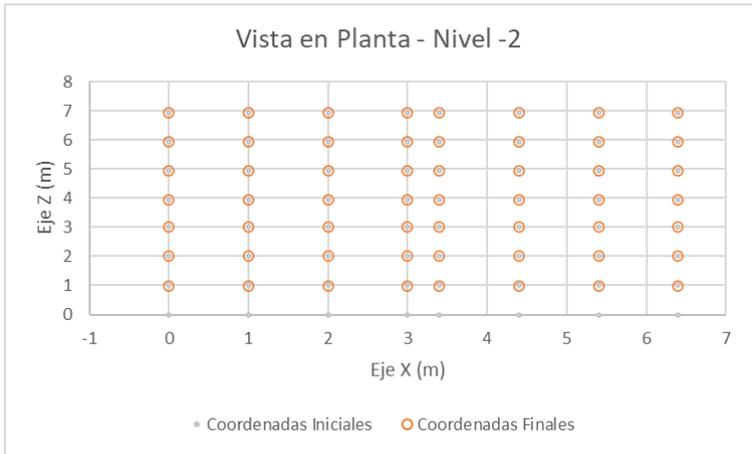
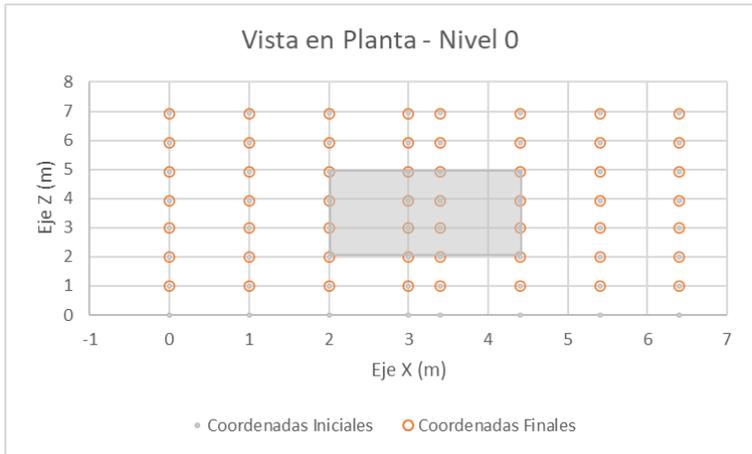
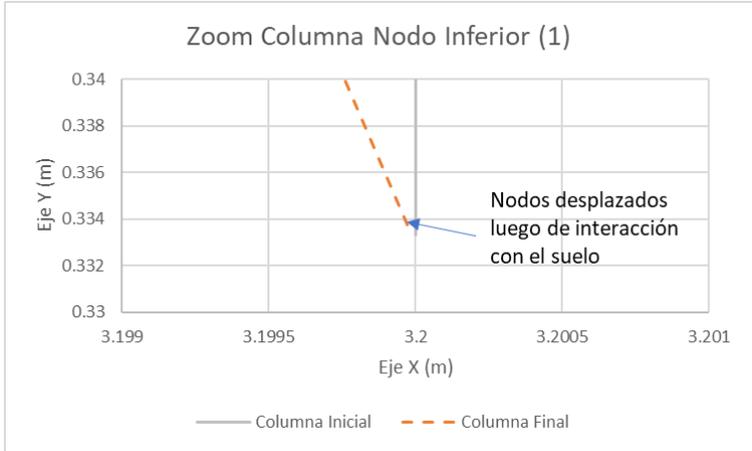
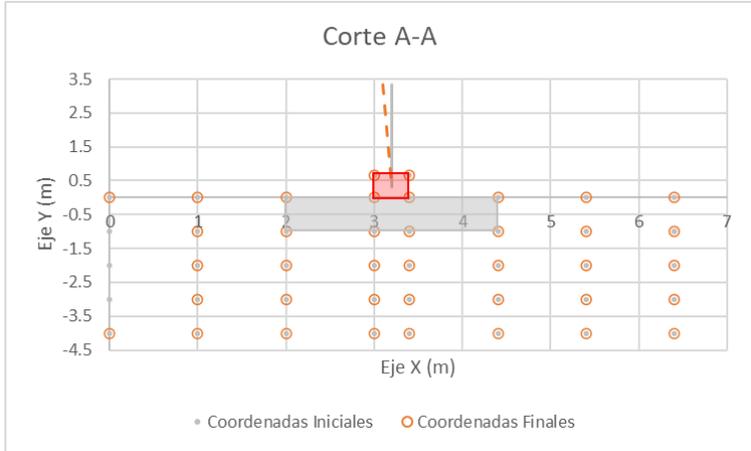


Figura 18 Vista en planta de la zapata – Modelo 2



Elemento de Transición
 Zapata en Concreto
 Columna Estado Inicial
 Columna Estado Final

Figura 19 Secciones de análisis del suelo – Modelo 2

Luego de este análisis se realizó la comprobación de los resultados con la malla en elementos finitos que representa todo el sistema (columna, cimentación y suelo). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5 Resultados modelo de comprobación – Modelo 2

RESUMEN DESPLAZAMIENTOS					
u56	-4.52E-06	v56	-7.31E-05	w56	-4.06E-03
u57	-1.11E-06	v57	-6.00E-05	w57	-4.06E-03
u58	2.87E-06	v58	-4.69E-05	w58	-4.05E-03
u63	-1.25E-05	v63	1.88E-05	w63	-4.07E-03
u64	-1.22E-05	v64	2.28E-05	w64	-4.07E-03
u65	-1.25E-05	v65	2.75E-05	w65	-4.06E-03
u70	-2.77E-05	v70	1.46E-04	w70	-4.07E-03
u71	-3.11E-05	v71	1.44E-04	w71	-4.07E-03
u72	-3.32E-05	v72	1.32E-04	w72	-4.07E-03
PROMEDIOS					
up	-1.47E-05	vp	3.46E-05	Wp	-4.06E-03
θ_{xp}	-2.56E-02	θ_{yp}	1.22E-02	θ_{zp}	2.26E-02

En la Tabla 6 se evidencia la comparación entre los resultados obtenidos en el análisis matricial que se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y los resultados obtenidos del modelo de verificación que se muestran en la Tabla 5 se puede comprobar que, aunque los resultados no son los mismos, los valores obtenidos están en el mismo orden de magnitud.

Tabla 6 Comparación resultados de análisis del Modelo 2

RESUMEN DESPLAZAMIENTOS POR AMBAS METODOLOGÍAS			
Elemento de transición Propuesto		Modelado en Malla de Elementos Finitos	
up	-2.67E-05	up	-1.47E-05
vp	3.63E-04	vp	3.46E-05
Wp	-6.23E-03	Wp	-4.06E-03
θ_{xp}	-2.62E-02	θ_{xp}	-2.56E-02
θ_{yp}	2.72E-02	θ_{yp}	1.22E-02
θ_{zp}	-2.70E-02	θ_{zp}	2.26E-02

Modelo 3

El elemento de transición para este modelo tiene dimensiones de 1.5m*1.4m*1.4m que corresponde a unas fuerzas aplicadas en el nodo superior de la columna iguales a $F_x = -30$ Ton, $F_y = -100$ Ton, $F_z = -45$ Ton, $M_x = 30$ Ton*m, $M_y = 10$ Ton*m y $M_z = 40$ Ton*m.

En la Figura 20 y Figura 21 se muestran los resultados del análisis matricial y la interacción del suelo para este modelo, en este se identifican los desplazamientos y rotaciones en el nodo inferior de la columna. En el nodo superior de la columna se estimó una deformación en el eje x de 9cm y en el nodo inferior de 0.05 mm.

		u2	v2	w2	θx2	θy2	θz2	u1	v1	w1	θx1	θy1	θz1		
X2	-30	4630	0	0	0	0	-6944	-4630	0	0	0	0	-6944	-9.1E-02	u2
Y2	-100	0	166667	0	0	0	0	0	-166667	0	0	0	0	3.2E-05	v2
Z2	45	0	0	4630	6944	0	0	0	0	-4630	6944	0	0	-6.5E-02	w2
M _{x2}	30	0	0	6944	13889	0	0	0	0	-6944	6944	0	0	1.5E-02	θx2
M _{y2}	10	0	0	0	0	2445	0	0	0	0	0	-2445	0	-2.3E-02	θy2
M _{z2}	40	-6944	0	0	0	0	13889	6944	0	0	0	0	6944	-2.9E-02	θz2
X1	30.00	-4630	0	0	0	0	6944	4630	0	0	0	0	6944	5.0E-05	u1
Y1	100.00	0	-166667	0	0	0	0	0	166667	0	0	0	0	6.3E-04	v1
Z1	-45.00	0	0	-4630	-6944	0	0	0	0	4630	-6944	0	0	-1.3E-02	w1
M _{x1}	105.00	0	0	6944	6944	0	0	0	0	-6944	13889	0	0	2.6E-02	θx1
M _{y1}	-10.00	0	0	0	0	-2445	0	0	0	0	0	2445	0	-2.7E-02	θy1
M _{z1}	50.00	-6944	0	0	0	0	6944	6944	0	0	0	0	13889	-2.7E-02	θz1

Figura 20 Resultado de análisis en la columna – Modelo 3

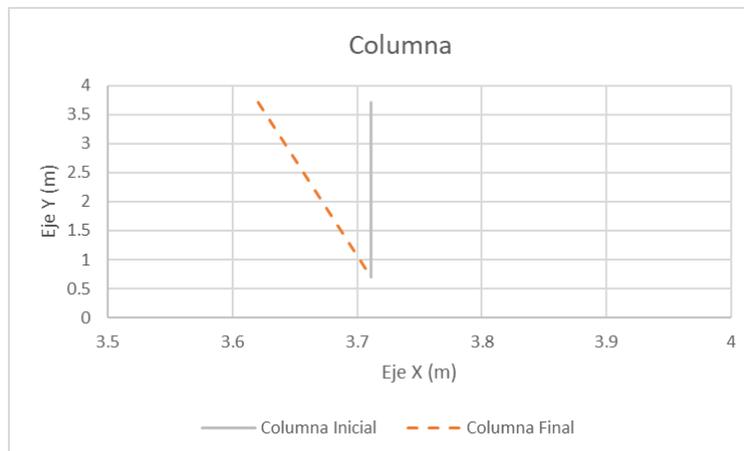


Figura 21 Modelo Columna – Modelo 3

En la Figura 24 se presenta la respuesta del suelo luego de la interacción con la columna, en esta se evidencia rotación en la columna y asentamientos.

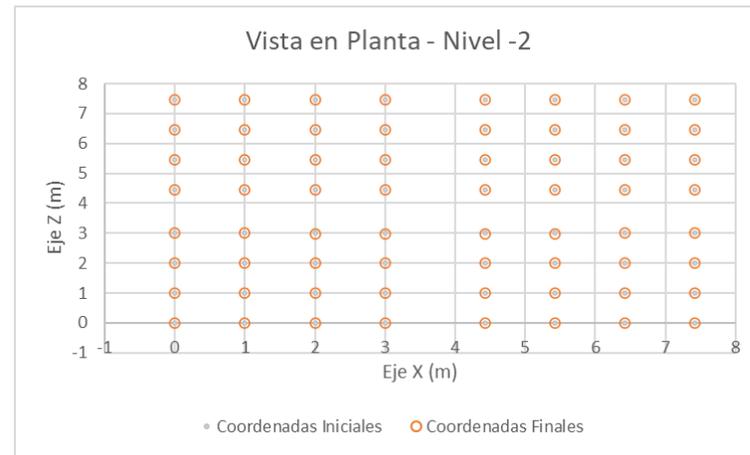
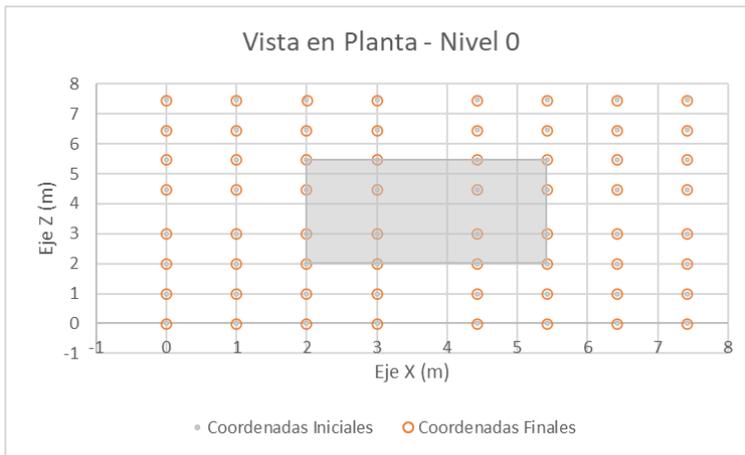
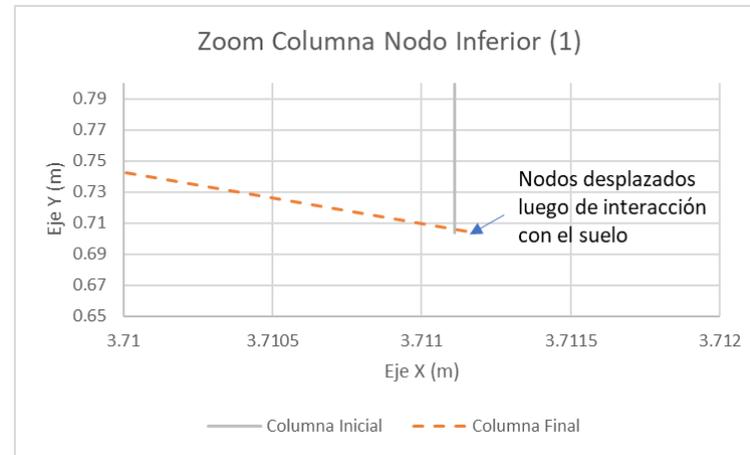
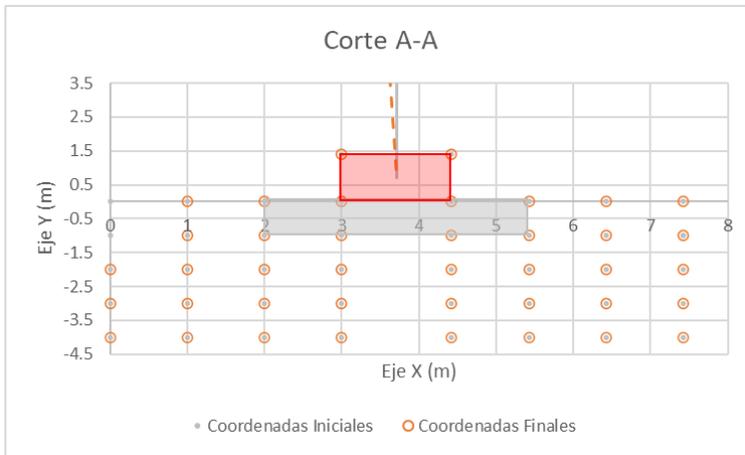
Si se hace una revisión específica de los desplazamientos y rotaciones en la columna, se puede observar como la deformación en la base de la zapata es irregular en los extremos y en el centro es mínima, adicionalmente en planta se evidencia desplazamientos en el eje X y Z debidos a la interacción con la estructura.



Figura 22 Vista en planta de la zapata – Modelo 3



Figura 23 Perfil de deformación bajo la zapata – Modelo 3



Elemento de Transición
 Zapata en Concreto
 - - - - Columna Estado Inicial - - - - Columna Estado Final

Figura 24 Secciones de análisis del suelo – Modelo 3

Luego de este análisis se realizó la comprobación de los resultados con la malla en elementos finitos que representa todo el sistema (columna, cimentación y suelo). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7 Resultados modelo de comprobación – Modelo 3

RESUMEN DESPLAZAMIENTOS					
u56	7.88E-06	v56	1.15E-04	w56	6.38E-03
u57	2.53E-06	v57	9.40E-05	w57	6.38E-03
u58	-3.70E-06	v58	7.32E-05	w58	6.37E-03
u63	2.08E-05	v63	-2.98E-05	w63	6.39E-03
u64	2.03E-05	v64	-3.64E-05	w64	6.39E-03
u65	2.09E-05	v65	-4.40E-05	w65	6.38E-03
u70	4.50E-05	v70	-2.30E-04	w70	6.40E-03
u71	5.04E-05	v71	-2.26E-04	w71	6.40E-03
u72	5.37E-05	v72	-2.09E-04	w72	6.39E-03
PROMEDIOS					
up	2.42E-05	vp	-5.48E-05	Wp	6.39E-03
θ_{xp}	-2.55E-02	θ_{yp}	1.24E-02	θ_{zp}	2.27E-02

En la Tabla 8 se evidencia la comparación entre los resultados obtenidos en el análisis matricial que se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y los resultados obtenidos del modelo de verificación que se muestran en la Tabla 7 se puede comprobar que, aunque los resultados no son los mismos, los valores obtenidos están en el mismo orden de magnitud.

Tabla 8 Comparación resultados de análisis del Modelo 3

RESUMEN DESPLAZAMIENTOS POR AMBAS METODOLOGÍAS			
Elemento de transición Propuesto		Modelado en Malla de Elementos Finitos	
up	5.03E-05	up	2.42E-05
vp	6.32E-04	vp	-5.48E-05
Wp	-1.25E-02	Wp	6.39E-03
θ_{xp}	2.60E-02	θ_{xp}	-2.55E-02
θ_{yp}	-2.74E-02	θ_{yp}	1.24E-02
θ_{zp}	-2.74E-02	θ_{zp}	2.27E-02

Modelo 4

En el último modelo analizado se dimensiono un elemento de transición inicial de 1.4m*0.8m*1.6m, las fuerzas y momentos aplicadas en el nodo superior de la columna corresponden a $F_x = -20$ Ton, $F_y = -115$ Ton, $F_z = 60$ Ton, $M_x = 50$ Ton*m, $M_y = 10$ Ton*m y $M_z = 30$ Ton*m.

Como se muestra en la Figura 25 se identifican desplazamientos y rotaciones en la columna, los desplazamientos en el nodo inferior de la columna se asocian a la interacción entre el suelo y la estructura. En la Figura 26 y Figura 27 se pueden observar los desplazamientos obtenidos, para el nodo superior se obtuvo un desplazamiento en el eje x de 8.6cm y en el nodo inferior de $8.7e-5$ cm.

		u2	v2	w2	θx2	θy2	θz2	u1	v1	w1	θx1	θy1	θz1		
X2	-20	4630	0	0	0	0	-6944	-4630	0	0	0	0	-6944	-8.6E-02	u2
Y2	-115	0	166667	0	0	0	0	0	-166667	0	0	0	0	1.5E-04	v2
Z2	60	0	0	4630	6944	0	0	0	0	-4630	6944	0	0	-7.0E-02	w2
M _{x2}	50	0	0	6944	13889	0	0	0	0	-6944	6944	0	0	1.6E-02	θx2
M _{y2}	10	0	0	0	0	2445	0	0	0	0	0	-2445	0	-2.3E-02	θy2
M _{z2}	30	-6944	0	0	0	0	13889	6944	0	0	0	0	6944	-2.7E-02	θz2
X1	20.00	-4630	0	0	0	0	6944	4630	0	0	0	0	6944	8.7E-07	u1
Y1	115.00	0	-166667	0	0	0	0	0	166667	0	0	0	0	8.4E-04	v1
Z1	-60.00	0	0	-4630	-6944	0	0	0	0	4630	-6944	0	0	-1.8E-02	w1
M _{x1}	130.00	0	0	6944	6944	0	0	0	0	-6944	13889	0	0	2.7E-02	θx1
M _{y1}	-10.00	0	0	0	0	-2445	0	0	0	0	0	2445	0	-2.7E-02	θy1
M _{z1}	30.00	-6944	0	0	0	0	6944	6944	0	0	0	0	13889	-2.7E-02	θz1

Figura 25 Resultado de análisis en la columna – Modelo 4

Por otro lado, se realizaron análisis de la malla de desplazamientos del suelo y la cimentación (Ver Figura 29), en esta se identificó principalmente, una deformación irregular en la base de la zapata (Ver Figura 27), además, como se ve en la Figura 28 se evidencia desplazamiento de los nodos en sentido del eje Z.

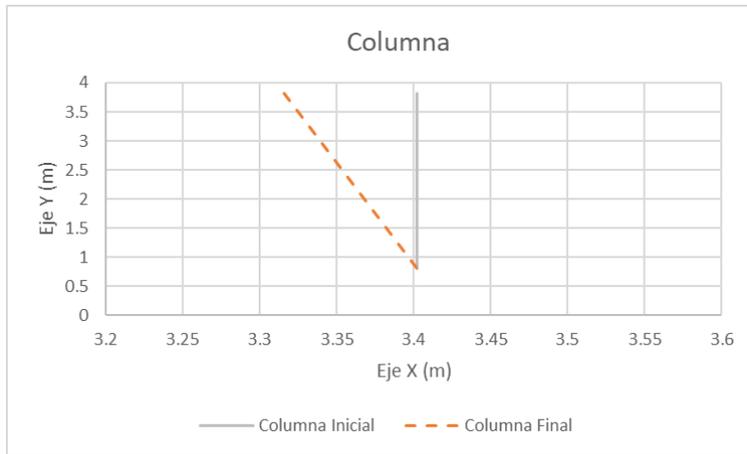


Figura 26 Modelo Columna – Modelo 4

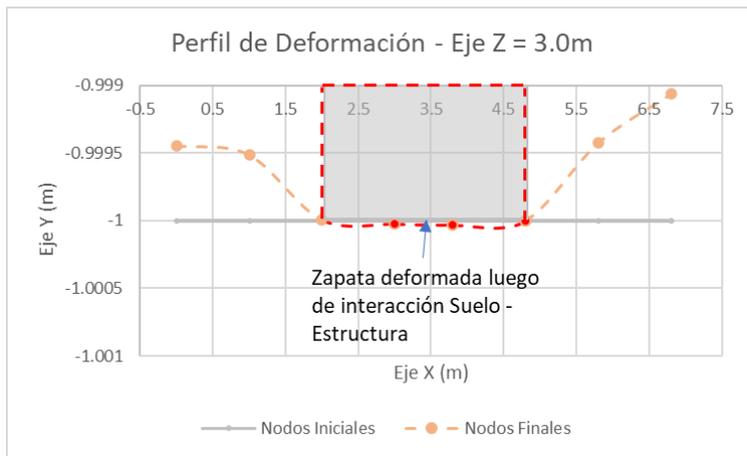


Figura 27 Perfil de deformación bajo la zapata – Modelo 4

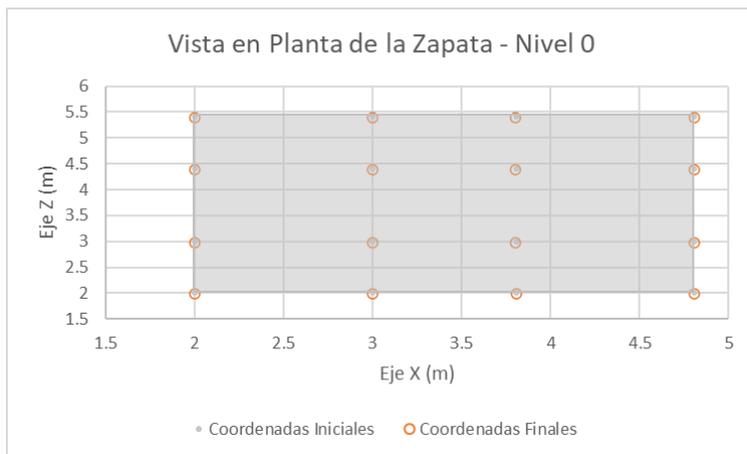
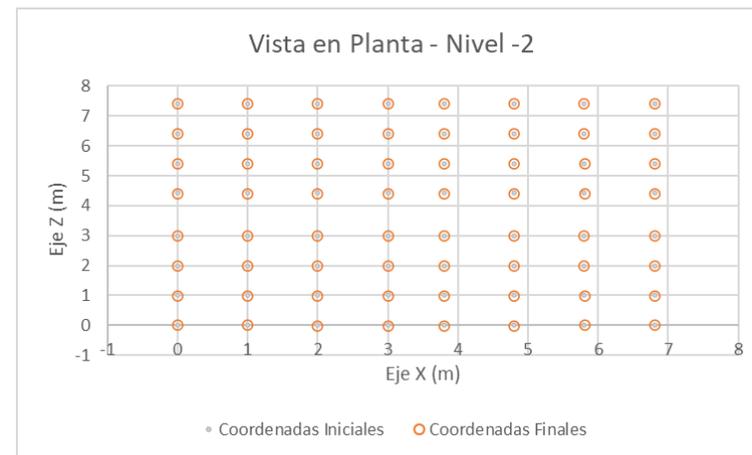
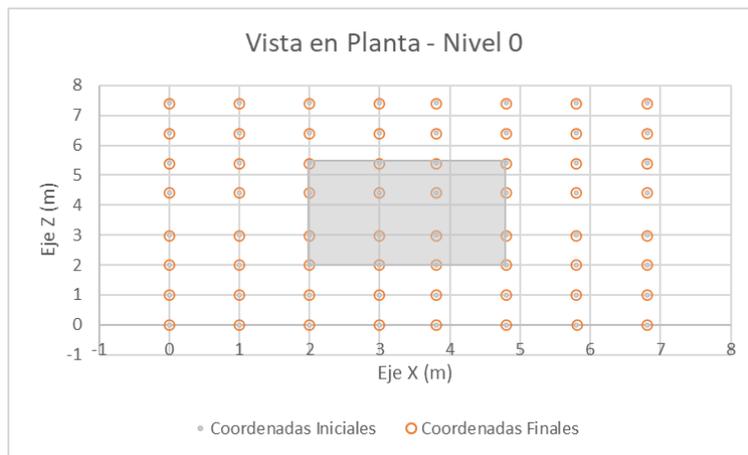
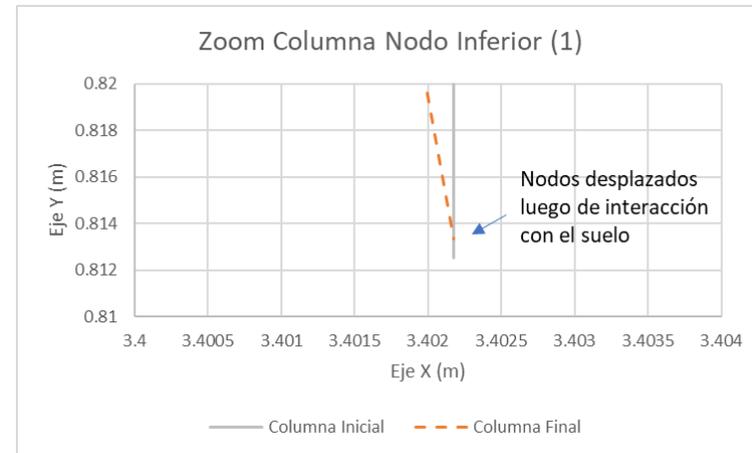
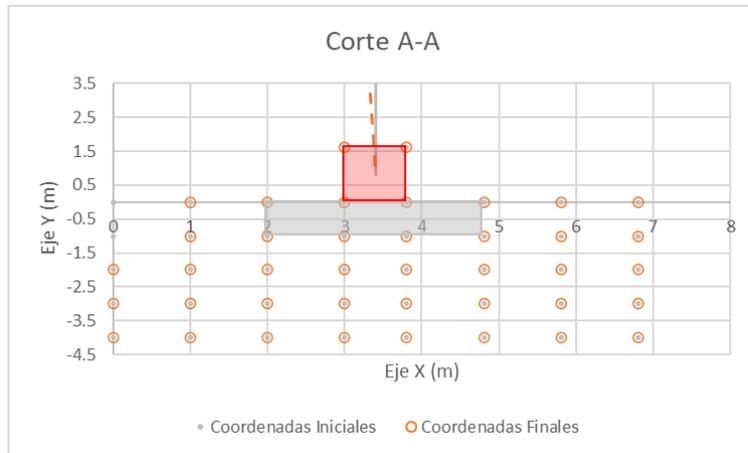


Figura 28 Vista en planta de la zapata – Modelo 4



Elemento de Transición
 Zapata en Concreto
 Columna Estado Inicial
 Columna Estado Final

Figura 29 Secciones de análisis del suelo – Modelo 4

Luego de este análisis se realizó la comprobación de los resultados con la malla en elementos finitos que representa todo el sistema (columna, cimentación y suelo). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9 Resultados modelo de comprobación – Modelo 4

RESUMEN DESPLAZAMIENTOS					
u56	7.88E-06	v56	1.15E-04	w56	6.38E-03
u57	2.53E-06	v57	9.40E-05	w57	6.38E-03
u58	-3.70E-06	v58	7.32E-05	w58	6.37E-03
u63	2.08E-05	v63	-2.98E-05	w63	6.39E-03
u64	2.03E-05	v64	-3.64E-05	w64	6.39E-03
u65	2.09E-05	v65	-4.40E-05	w65	6.38E-03
u70	4.50E-05	v70	-2.30E-04	w70	6.40E-03
u71	5.04E-05	v71	-2.26E-04	w71	6.40E-03
u72	5.37E-05	v72	-2.09E-04	w72	6.39E-03
PROMEDIOS					
up	2.42E-05	vp	-5.48E-05	Wp	6.39E-03
θxp	-2.55E-02	θyp	1.24E-02	θzp	2.27E-02

En la Tabla 9 se evidencia la comparación entre los resultados obtenidos en el análisis matricial que se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y los resultados obtenidos del modelo de verificación que se muestran en la Tabla 9 se puede comprobar que, aunque los resultados no son los mismos, los valores obtenidos están en el mismo orden de magnitud.

Tabla 10 Comparación resultados de análisis del Modelo 4

RESUMEN DESPLAZAMIENTOS POR AMBAS METODOLOGÍAS			
Elemento de transición Propuesto		Modelado en Malla de Elementos Finitos	
up	8.66E-07	up	2.42E-05
vp	8.44E-04	vp	-5.48E-05
Wp	-1.83E-02	Wp	6.39E-03
θxp	2.74E-02	θxp	-2.55E-02
θyp	-2.68E-02	θyp	1.24E-02
θzp	-2.74E-02	θzp	2.27E-02

Como se muestra en los modelos analizados, la cimentación de las diferentes columnas analizadas presenta deformaciones y rotaciones en la cimentación, esto, contrario a lo usualmente desarrollado en la práctica ingenieril, en donde como lo presenta Uribe

(2002) se simplifica el análisis matricial de elementos estructurales asumiendo los desplazamientos y rotaciones en el nodo inferior de la columna como cero.

Teniendo en cuenta lo anterior y, luego de realizar las diferentes iteraciones, el elemento de transición mantiene sus dimensiones iniciales en cada modelo analizado, siendo las variaciones números decimales no representativos.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que el elemento de transición dimensionado permite la modelación y análisis de interacción suelo–estructura en condición estática, en 3 dimensiones, con el método de los elementos finitos para modelar el suelo y, en forma simultánea, el uso del análisis matricial para la simulación de la estructura. De igual manera, la metodología presentada para dimensionar un elemento de transición entre la columna y el suelo permite una compatibilidad entre el análisis matricial de estructuras y el método de los elementos finitos. El elemento de transición dimensionado permite estimar las deformaciones y rotaciones resultantes de la interacción de la estructura con el suelo.

La comprobación realizada con el modelo conformado por una malla de elementos finitos en 3 dimensiones que representa todo el sistema (columna, zapata y suelo), mostro que, aunque los resultados numéricos no son los mismos, tienen un orden de magnitud similar, la diferencia entre estos se puede deber a que son metodologías diferentes. Por lo anterior, es posible afirmar que el elemento de transición diseñado da resultados confiables y en un orden de magnitud adecuado.

Las deformaciones resultantes de los análisis en el nodo inferior de la columna corresponden a valores cercanos a cero, este valor puede estar condicionado a las variables que no cambiaron entre modelos, es decir que, es posible que los resultados pueden variar con factores como las características del suelo, la geometría de la columna, la magnitud de las cargas, entre otros.

Al dimensionar el elemento de transición se encontró que este tiene dimensiones que en algunos casos son mayores que las dimensiones de la columna, en estos casos no se espera que esto afecte los análisis debido a que al tener una rigidez infinita las fuerzas se transmitirán al suelo en la misma magnitud que en la columna de igual manera se espera que no se generen excentricidades ni momentos adicionales a los utilizados para dimensionar el elemento.

Gracias a los resultados obtenidos se podría implementar este modelo en las áreas involucradas en el diseño general de obras civiles, al igual que en el análisis de otras problemáticas como la distribución de cargas en sistemas placa-pilote, en sistemas de mejoramiento del suelo (inclusiones rígidas, columnas de grava) y otros. Lo anterior debido a que permitirá analizar a detalle el comportamiento entre las estructuras propuestas y el suelo, al igual, que las deformaciones que se generen en cada uno de estos.

Se evidencia en la cimentación que las deformaciones estimadas a través del modelo compuesto por el análisis matricial en la estructura, el elemento de transición y el modelo de elementos finitos para el suelo y la cimentación permite determinar las deformaciones en la base de la cimentación, siendo estas deformaciones no simétricas ni proporcionales, esto quiere que es posible estimar la influencia de las cargas y momentos aplicados en la columna en las tres dimensiones y su influencia en la cimentación.

Esta metodología nos permitirá reducir la incertidumbre y aumentar la redundancia. Lo anterior, tendrá como consecuencia diseños más seguros que respondan a las necesidades que se han evidenciado en los últimos años en Colombia.

Al evaluar las diferentes combinaciones de fuerzas y momentos, se encontró como limitaciones que, en algunas de estas, las dimensiones del elemento de transición son nulas, esto quiere decir que el elemento no se puede modelar en 3 dimensiones, por lo que no permite su análisis con el mallado que representa el suelo y la cimentación. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan algunos ejemplos de lo anterior.

Tabla 11 Ejemplo de combinaciones de fuerza que presentan limitaciones

	Modelo	1	2	3	4
Fuerzas	Fuerza X (Ton)	-10	-10	10	35
	Fuerza Y (Ton)	-200	25	100	150
	Fuerza Z (Ton)	30	30	30	20
	Momento X (Ton*m)	-10	-25	-25	30
	Momento Y (Ton*m)	10	-48	-48	25
	Momento Z (Ton*m)	20	33	33	33
Dimensiones Iniciales Elemento Transición	L1 (m)	-0.4	0.6	-7.8	0.0
	L2 (m)	0.6	-3.0	-0.6	2.5
	L3 (m)	9.0	8.1	-18.5	2.9

Con base en estas combinaciones de cargas y momentos en donde las dimensiones del elemento modelado son nulas, en este caso la metodología propuesta no puede ser aplicada. Es preciso asegurar que en un primer dimensionamiento de las cargas que lleguen a la columna, se debe evaluar la posibilidad del uso de esta metodología.

Para próximas investigaciones, se recomienda implementar la metodología desarrollada en lenguajes de programación que permitan realizar el análisis en un menor tiempo y de manera óptima. Para lo anterior, el software a desarrollar deberá permitir analizar modelos estructurales complejos representados con el método matricial para la simulación de la estructura y de igual manera, que permita modelar el suelo y la cimentación para diferentes condiciones geotécnicas. Se debe tener en cuenta que la primera verificación que deberá realizar este programa es si las combinaciones de carga que lleguen a las diferentes columnas permiten dimensionar un elemento de transición de dimensiones no nulas.

Adicionalmente, luego de contar con el software anteriormente propuesto, se podrán desarrollar diferentes análisis de sensibilidad con diferentes variables, entre las que se pueden contemplar diferentes tipos de suelo, condiciones geotécnicas, materiales para la estructura, dimensiones, magnitud de cargas, entre otros.

En la investigación realizada no se contempla ninguna interfaz adicional, entre la interacción de la cimentación y el suelo, es claro que esta puede verse afectada por diferentes factores como los procesos constructivos por lo que en futuros proyectos esta puede ser considerada.

Por último, con la combinación del software y el análisis de sensibilidad realizado es posible determinar la interacción entre el suelo y la estructura y corroborar si la hipótesis usualmente utilizada de asumir los desplazamientos y rotaciones en el nodo inferior de la columna como cero son apropiados.

Referencias

- Bojanowski C. (2014). Numerical modeling of large deformations in soil structure interaction problems using FE, EFG, SPH, and MM-ALE formulations. *Archive of Applied Mechanics*. (84) 743–55. Betancour, J. (22 de marzo de 2019).
- Denicol, J., Davies, A y Krystallis, I. (2020) What are the Causes and Cures of Poor Megaproject Performance? A Systematic Literature Review and Reseach Agenda. *Project Managment Journal*. 00 (0), 1-18
- Delgado-Vargas, M. (1998) *Interacción Suelo Estructura*, Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Gong, J., Zou, D., Kong, X., Qu, Y. y Liu, J. (2019). An extended meshless method for 3D interface simulating soil-structure interaction with flexibly distributed nodes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. (125) 105688
- Jie, Y., Tang, X., Luan, M. y Yang, Q. (2008) Adaptive element free Galerkin method applied to analysis of earthquake induced liquefaction. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. (7), 217–224
- Lu, Y., Wang, Z. y Chong, K. (2005). A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. (25) 275-288.
- Moya-Barrios, J., Salazar-Ferro, R., Gómez-Agudelo, G. y Salazar-Ferro, F. (1999) *Excavaciones en Condiciones Complejas*, Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería
- Queiroz, W. y Breves, H. (2012). Numerical combination for nonlinear analysis structures coupled to layered soils. *Latin American Journal of Solids and Structures*. (1) 1-23
- Ramírez, C. (2013). *Diseño de un elemento de transición que simule una correcta interacción estática suelo-estructura*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.
- Terzaghi K. y Peck R. (1948). *Soil Mechanics In Engineering Practice*. Wiley: New York. 566
- Uribe, J. (2002). *Análisis de estructuras*. Escuela colombiana de ingeniería, Bogota.
- Zhang, X., Lu, M. y Wegner, J. (2000). A 2-D meshless model for jointed rock structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 10) 1649–1661.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (1994). *El método de los elementos finitos*.