

# Análisis tridimensional de la interacción suelo-estructura estática de un edificio con cimentación a base de zapatas desplantado sobre un suelo friccionante

Armando HERMOSILLO<sup>a,1</sup>, Héctor SANGINÉS<sup>a</sup>, Agustín DEMENEGHI<sup>a</sup> y Norma LEGORRETA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ingeniería, Departamento de Estructuras, UNAM

**Resumen.** La interacción suelo-estructura es un área de la ingeniería civil en donde se estudian las deformaciones en el terreno ocasionadas por la presencia de una estructura. Para su estudio, se hacen compatibles las deformaciones inducidas en el suelo y las deformaciones presentadas en la estructura de cimentación. Por tanto, el proceso de cálculo de las deformaciones puede resumirse como sigue: 1) Cálculo de deformaciones en el suelo, b) Cálculo de deformaciones en la subestructura y c) Compatibilidad de las deformaciones entre el suelo y la subestructura. En este artículo se presenta un análisis tridimensional de la interacción estática suelo- estructura de un edificio con cimentación a base de zapatas utilizando el programa ISE3D (desarrollado por los autores); por un lado se plantea el análisis estructural del edificio a través del método de rigideces, mientras que las deformaciones en el suelo se plantean mediante una ecuación constitutiva lineal o no lineal. Al resolverse el sistema de ecuaciones total se logra la compatibilidad de deformaciones. Al final se presentan comentarios y conclusiones acerca del método utilizado.

**Palabras Clave.** Interacción suelo-estructura, método de las rigideces, compatibilidad de deformaciones, matriz de flexibilidades.

## 1. Introducción

La interacción suelo-estructura (ISE) es aquella parte de la ingeniería que estudia las deformaciones del terreno de cimentación cuando éstas se ven afectadas por la presencia y rigidez de la propia estructura. La influencia de la estructura puede darse en condiciones estáticas, lo cual es tratado por la interacción estática suelo-estructura, o puede ser en condiciones dinámicas, lo cual cae en el campo de la interacción dinámica suelo-estructura.

Se conocen como métodos de interacción estática suelo-estructura aquellos procedimientos que para el cálculo de las deformaciones del terreno de cimentación toman en cuenta la rigidez de la estructura. Todos estos métodos están basados en el principio de que en el contacto cimiento-terreno los desplazamientos tanto en la

---

<sup>1</sup> Profesor de la Facultad de Ingeniería, UNAM, Departamento de Estructuras. Av. Universidad #3000, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán. Ciudad de México. CP. 04510; E-mail: ahermosilloa@comunidad.unam.mx.

subestructura como los del terreno son iguales, es decir, existe compatibilidad de deformaciones entre estructura y suelo.

En términos generales, el procedimiento de cálculo para la interacción suelo-estructura consiste en tres pasos: (a) se calculan los desplazamientos de la subestructura, (b) se calculan los desplazamientos del terreno de cimentación, y (c) se establece la compatibilidad de deformaciones entre estructura y suelo.

Podemos distinguir dos clases de situaciones en relación con la interacción: (i) cuando los cimientos están suficientemente separados, de tal forma que la carga sobre un apoyo no ejerce influencia sobre los desplazamientos de los apoyos vecinos (este fenómeno se presenta usualmente en zapatas aisladas), y (ii) cuando se trata de un cimiento continuo donde el desplazamiento de un punto de dicho cimiento está afectado por la carga repartida en toda la subestructura (es el caso de zapatas corridas o losas de cimentación).

En el artículo [1] se presenta un análisis de interacción suelo-estructura de una zapata corrida sobre un suelo friccionante. En dicho trabajo se utiliza una ecuación constitutiva no lineal propuesta por Deméneghi [2] para la compatibilidad de deformaciones. Así mismo, en el artículo [3] se presenta el análisis de interacción suelo-estructura-superestructura usando como ejemplo un marco apoyado sobre un suelo friccionante; también se usó para la compatibilidad de deformaciones la ecuación constitutiva no lineal propuesta por Deméneghi.

En el artículo [4] se presenta un análisis de interacción suelo-estructura considerando una losa de cimentación. En este trabajo se analiza la interacción estática suelo-cimentación de un edificio con una cimentación a base de zapatas corridas, apoyada sobre un suelo friccionante, primero usando la teoría de elasticidad y después utilizando una ecuación constitutiva no lineal de deformación para suelos granulares propuesta por Deméneghi [2]. El análisis estructural se realiza por el método de rigideces, mientras que la compatibilidad de deformaciones se realiza con la solución de un sistema de ecuaciones lineales y no lineales con el método de Newton.

Para los análisis se utilizó el programa ISE3D18 el cual tiene la capacidad de analizar estructuras tridimensionales [5].

## 2. Análisis estructural

El análisis estructural se realiza con el método de las rigideces, en el que se debe cumplir la siguiente igualdad:

$$\underline{K}\bar{\delta} + \bar{P}_e + \bar{P}_c = 0 \quad (1)$$

donde  $\underline{K}$  = matriz de rigidez de la estructura,  $\bar{\delta}$  = vector de desplazamientos (grados de libertad),  $\bar{P}_e$  = vector de cargas de empotramiento y  $\bar{P}_c$  = vector de cargas concentradas.

La matriz de rigidez elemental de una barra puede consultarse en la referencia [6], la cual consta de 12GL, así como el ensamble de la matriz de rigidez total de todo el sistema. Para más detalles del procedimiento de interacción suelo-estructura seguido pueden consultarse las referencias [1-5 y 7].

### 3. Cálculo de deformaciones del suelo con una ecuación de comportamiento no lineal [2]

El cálculo de las deformaciones verticales de una cimentación en suelos friccionantes de espesor  $\Delta z_o$ , sujeto a incrementos de esfuerzos  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  está dado por [2]:

$$\delta_z = \left\{ 1 - \exp \left\{ - \frac{f[(p_{co} + c\sigma_z)^{1-s} - (p_{co})^{1-s}]}{(1-s)cAP_a^{1-s}} \right\} \right\} \Delta z_o \quad (2)$$

donde  $f = 1 - v(a_1 + a_2)$ ;  $a_1 = \sigma_x/\sigma_z$ ;  $a_2 = \sigma_y/\sigma_z$ ,  $s$ : es coeficiente que depende del tipo de suelo, el cual vale 0.5 para suelos friccionantes.

$$c = 1/3 + 1/3(a_1 + a_2) \quad (3)$$

Los incrementos de esfuerzo  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  se calculan a partir de

$$\sigma_{zij} = \sum_{k=1}^n I_{zij} r_k d_k / a_k; \quad \sigma_{xij} = \sum_{k=1}^n I_{xij} r_k d_k / a_k; \quad \sigma_{yij} = \sum_{k=1}^n I_{yij} r_k d_k / a_k$$

donde los subíndices representan  $i$ =Nodo  $i$ ,  $j$ = Estrato  $j$ ,  $k$ =Carga  $k$  y  $I_z$ : valor de influencia, es el incremento de esfuerzo vertical, a la profundidad  $z$ , producido por una carga unitaria en la esquina de un rectángulo cargado uniformemente y se calcula con la ecuación de Damy [8]

$$I_z = \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{x^2+z^2} + \frac{1}{y^2+z^2} \right) \frac{xyz}{B} + \tan^{-1} \frac{xy}{zB} \right] \quad (4)$$

$I_x$  e  $I_y$  son los valores de influencia horizontales, producidos por una carga unitaria, en la esquina de un rectángulo cargado uniformemente; se calculan con las ecuaciones de Dashkó y Kagán [9]

$$I_x = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \frac{xyz}{B(x^2+z^2)} - \tan^{-1} \frac{zB}{xy} + (1-2\nu) \left( \tan^{-1} \frac{y}{x} - \tan^{-1} \frac{yB}{xz} \right) \right] \quad (5)$$

$$I_y = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \frac{xyz}{B(y^2+z^2)} - \tan^{-1} \frac{zB}{xy} + (1-2\nu) \left( \tan^{-1} \frac{x}{y} - \tan^{-1} \frac{xB}{yz} \right) \right] \quad (6)$$

donde

$$p_{co} = \frac{p_{vo} + p_{ho} + p_{ho}}{3} = \frac{p_{vo}}{3} (1 + 2K_o) \quad (7)$$

$p_{vo}$  es la presión vertical inicial y  $p_{ho}$  es la presión horizontal inicial.

El coeficiente  $K_o$  se calcula con la expresión de Mayne y Kulhawy [10]

$$K_o = (1 - \text{sen}\phi)(OCR)^{\text{sen}\phi} \quad (8)$$

OCR es la relación de preconsolidación del suelo, mientras que A es el módulo de rigidez del suelo, el cual puede calcularse con la expresión:

$$A = A_m C; \quad A_m = 26.25N^{1.125} \tag{9}$$

$$C = \exp \left[ -0.784t_\alpha \sqrt{1.00758 + 0.0152(\ln N - 2.976)^2} \right] \tag{10}$$

en donde N es el número de golpes de la penetración estándar y  $t_\alpha$  es una variable t de Student, cuyos valores en función de  $\alpha$  se muestran en la Tabla 1.

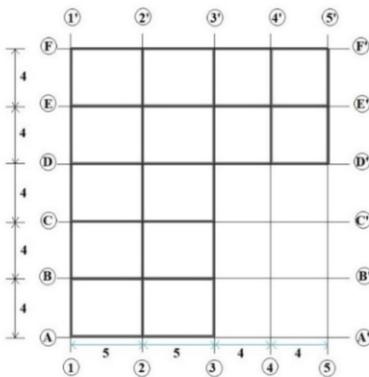
**Tabla 1.** Variable aleatoria t de Student.

Nivel de confianza $\alpha$ (%)	$t_\alpha$
2.5	1.978
5.0	1.657
10	1.288
15	1.041
20	0.844
25	0.676
30	0.526
40	0.254
50	0.000

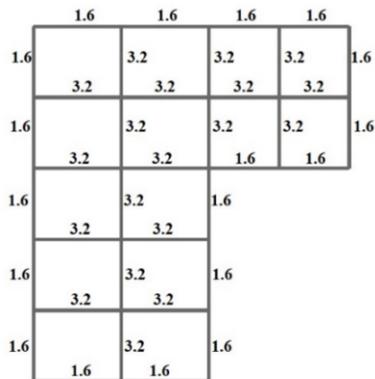
El procedimiento seguido para la compatibilidad de deformaciones y la solución del sistema de ecuaciones puede consultarse las referencias [1-5 y 7].

#### 4. Análisis de ise de un edificio sobre suelo friccionante

En esta sección se presenta el análisis de interacción suelo-estructura de un edificio de 4 niveles con una cimentación a base de zapatas corridas, apoyada sobre un suelo friccionante. El análisis se realizó utilizando el software ISE3D2018 desarrollado por M. I. Héctor Sanginés y el Dr. Armando Hermosillo [4] actualizado para considerar estructuras en tres dimensiones. Para más información acerca del software puede consultarse directamente con los autores de este trabajo.



**Figura 1.** Ejes de referencia sobre las barras de cimentación. Cotas en metros.



**Figura 2.** Sistema de cargas uniformemente distribuidas en cada barra del sistema de entrepisos y subestructura. Unidades en t/m.

En la Figura 3 se presenta la sub y superestructura constituida a base de barras y nodos. La cimentación en forma de “L”, a base de zapatas corridas (barras en color gris) se encuentra sobre dos estratos de suelo friccionante. Cada nivel de la superestructura se presenta mediante un color diferente. En la Figura 1 se presentan las dimensiones en planta, así como el sistema de ejes de referencia. Las cargas distribuidas en cada entrepiso y sobre las barras de cimentación se muestran en la Figura 2 (valores en t/m). Las propiedades de las barras de cimentación se presentan en la Tabla 2 y en las correspondientes a la superestructura en la Tabla 3. Las propiedades elásticas de los estratos de suelo se presentan en la Tabla 4 y mientras que las propiedades no lineales se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 2.** Propiedades de las barras en la cimentación.  $E$  es el módulo de elasticidad y  $\nu$  la relación de Poisson.

Barras	Base (m)	Altura (m)	Módulo $E$ ( $t/m^2$ )	$\nu$
Trabes	0.8	0.6	1130000	0.3

**Tabla 3.** Propiedades de vigas y columnas.  $E$  es el módulo de elasticidad y  $\nu$  la relación de Poisson.

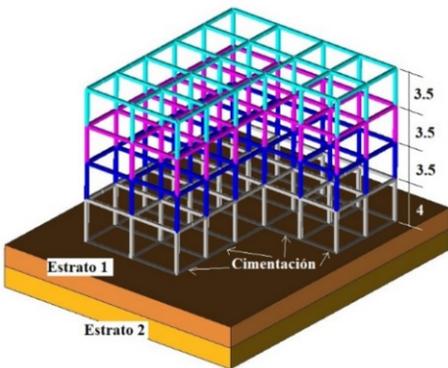
Barras	Base (m)	Altura (m)	Módulo $E$ ( $t/m^2$ )	$\nu$
Trabes	0.4	0.6	1130000	0.3
Columnas	0.4	0.6	1130000	0.3

**Tabla 4.** Propiedades elásticas de los suelos

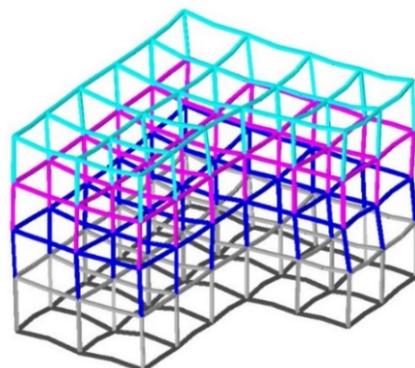
Estrato	$E$ ( $t/m^2$ )	$\nu$	$\gamma$ ( $t/m^3$ )	Espesor (m)
1	417.5	0.33	1.70	1.0
2	545.0	0.30	1.80	2.5

**Tabla 5.** Propiedades no- lineales de los suelos

Estrato	$A$	$s$	$\nu$	$K_0$	$K$
1	285.16	0.5	0.33	0.40869	419.7
2	394.28	0.5	0.30	0.39124	545.0



**Figura 3.** Modelo del edificio y cimentación sobre dos estratos de suelo friccionante. Cotitas en metros.



**Figura 4.** Estructura deformada considerando el suelo como un material lineal. Escala en metros.

4.1. Análisis de resultados

En primera instancia se muestra la configuración deformada de la estructura, muy similar en los casos lineal y no lineal del suelo. Como puede apreciarse en la Figura 4 desplazamientos en la superestructura obedecen al sentido de la gravedad, mientras que en las barras de la cimentación se aprecia que la configuración deformada va en contra de la gravedad, esto debido a las reacciones en el suelo ejercidas sobre la cimentación. En la Figura 5 se presentan los asentamientos obtenidos al considerar al suelo como elástico lineal y no-lineal. La coloración indica el valor del asentamiento indicado en la escala (metros).

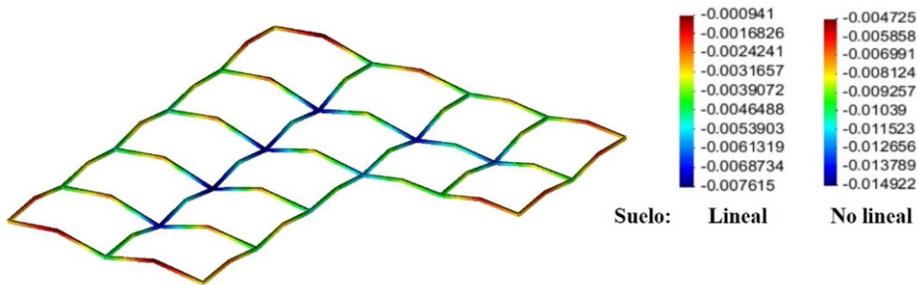


Figura 5. Desplazamientos calculados, casos lineal y no lineal. Escala en metros.

Para ambos casos se nota que sobre los ejes 2-2' y E-E' de la cimentación (mostrados la Figura 1) se presentan los máximos asentamientos y se observa una diferencia de 0.7 cm, lo cual representa el doble del asentamiento considerando al suelo como un material no lineal. En lo que sigue se presentan y comentan los diagramas de momentos calculados en los ejes mostrados en la figura 1, para los análisis lineal y no lineal.

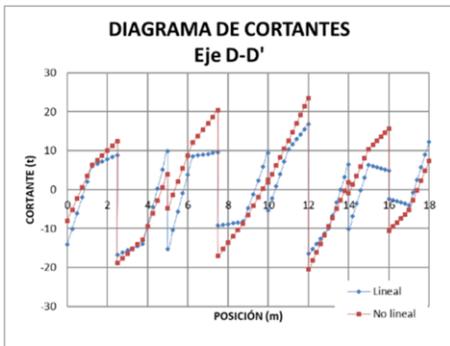


Figura 6. Diagramas de cortante, eje D-D'.

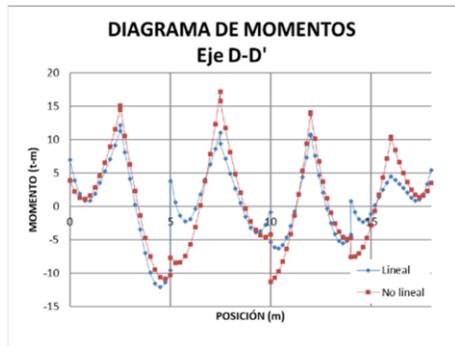


Figura 7. Diagramas de momentos, eje D-D'.

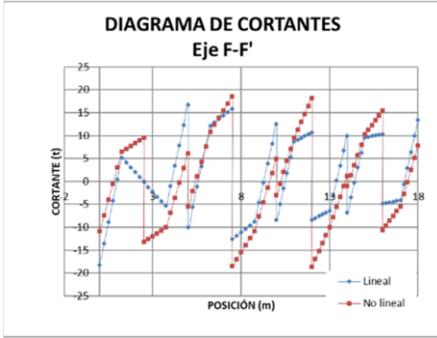


Figura 8. Diagramas de cortante, eje F-F'.

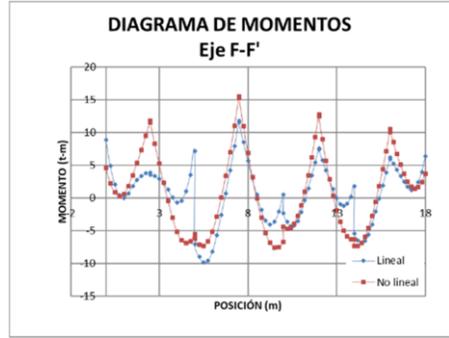


Figura 9. Diagramas de momentos, eje F-F'.

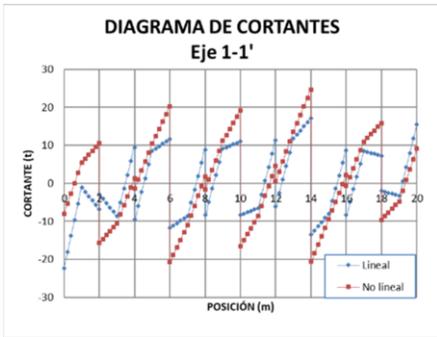


Figura 10. Diagramas de cortante, eje 1-1'.

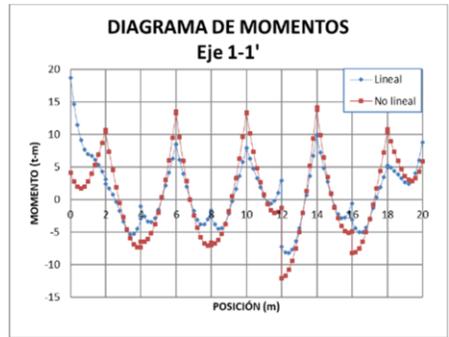


Figura 11. Diagramas de momentos, eje 1-1'.

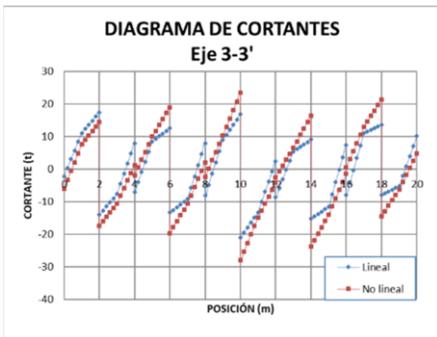


Figura 12. Diagramas de cortante, eje 3-3'.

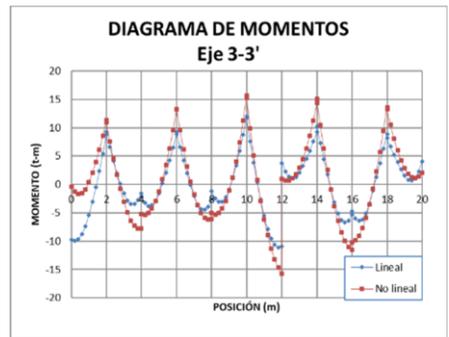


Figura 13. Diagramas de momentos, eje 3-3'.

De las gráficas de diagramas de fuerza cortantes y momentos flexionantes, mostradas en las Figuras 6-13 se observa una diferencia en cuanto a magnitud de los valores obtenidos al considerar la linealidad y no linealidad de suelo. Debido a la forma irregular de la estructura, los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante presentan cambios bruscos, inducidos por la interacción entre los diferentes marcos, tal como se observa en las Figuras 11 y 13, a la altura de los 12 m. En general, el efecto de considerar al suelo como un material no lineal se hace presente al obtenerse los cortantes y momentos flexionantes más desfavorables. Esto resulta de mucha ayuda

para el ingeniero que diseña, pues enriquece los criterios de diseño de elementos estructurales al tenerse mayor información sobre el comportamiento de las estructuras al tomar en cuenta la interacción con el suelo.

## 5. Conclusiones

- Los resultados obtenidos mediante el programa de computadora ISE3D2018, el cual ejecuta la interacción suelo-cimentación-superestructura y además considera la no linealidad del suelo, fueron satisfactorios.
- La forma asimétrica de la estructura induce configuraciones, en los diagramas de cortante y momento flexionante, diferentes a los obtenidos en una estructura simétrica [5].
- Con el programa ISE3D2018 se toman en cuenta efectos tridimensionales los cuales pueden ser importantes dependiendo de las características lineales y no lineales del suelo, así como de las propiedades geométricas y resistentes de la estructura.
- Mediante el uso del programa desarrollado puede obtenerse información muy importante la cual resulta útil en el diseño de estructuras y cimentaciones.
- En el estudio de la interacción suelo-estructura resulta necesario emplear ecuaciones constitutivas no lineales para tomar en cuenta el comportamiento no lineal de los suelos. En este trabajo se empleó la expresión para calcular desplazamientos en suelos friccionantes propuesta por Deméneghi [2].

## Referencias

- [1] Hermosillo A., Deméneghi A. y Sanginés H. (2012) "Cálculo de asentamientos con interacción suelo-estructura utilizando una ecuación constitutiva no lineal". XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Cancún, Quintana Roo, México.
- [2] Deméneghi A (2008) "Cálculo del asentamiento de un cimiento en arena". XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Aguascalientes, Ags.
- [3] Hermosillo A., Deméneghi A., Legorreta N. y Sanginés H. (2014) "Interacción Suelo – Estructura tomando en cuenta la superestructura, la sub estructura y el terreno de cimentación". XXVII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- [4] Hermosillo A., Deméneghi A. y Sanginés H. (2016) "Interacción suelo – estructura de una losa de cimentación sobre un suelo friccionante". XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, Mérida, Yucatán, México.
- [5] Hermosillo A., Sanginés H., Deméneghi A. y Legorreta N. (2018) "Efecto de la no linealidad del suelo en la interacción suelo-estructura en edificios con zapatas corridas". XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, León, Guanajuato, México.
- [6] Tena C. Arturo. Análisis de estructuras con métodos matriciales. Limusa. México (2007).
- [7] Sanginés H. (2000). "Interacción Suelo Estructura en Suelos Friccionantes". Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM
- [8] Damy, J (1985). "Integración de las ecuaciones de Boussinesq, Westergaard y Fröhlich, sobre superficies poligonales de cualquier forma, cargadas con fuerzas verticales uniformemente repartidas", Rev Ingeniería, Vol LV, N° 1: 82-86
- [9] Dashkó, R E y Kagán, A A (1980). Mecánica de Suelos en la Práctica de la Geología Aplicada a la Ingeniería, Cap 2, MIR, Moscú
- [10] Mayne, P W y Kulhawy, F H (1982) "K<sub>o</sub> –OCR relationships in soil". Jour Geot Eng Div, ASCE, GT8, junio.