



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

TESIS DE LICENCIATURA

---

**DISEÑO DE ZAPATAS AISLADAS  
MEDIANTE INTERACCIÓN ESTÁTICA  
SUELO-ESTRUCTURA**

---

*Autor:*  
Dayana PÉREZ RODRÍGUEZ

*Asesor:*  
Dr. Julio C. LEAL V.  
M.I. Francisco J. LUNA R.

*Una tesis presentada en cumplimiento de los requerimientos  
para el grado de Licenciado en Ingeniería Civil*

*en la*

División de Ingenierías  
Universidad de Guanajuato



## Declaración de Autoría

Yo, Dayana PÉREZ RODRÍGUEZ, declaro que la tesis titulada, «DISEÑO DE ZAPATAS AISLADAS MEDIANTE INTERACCIÓN ESTÁTICA SUELO-ESTRUCTURA» y el trabajo presentado en ella es de mi autoría. Yo confirmo que:

- Este trabajo se realizó totalmente mientras me encontraba en la candidatura de un grado de licenciatura en esta universidad.
- Si alguna parte de esta tesis ha sido sometida previamente a un título o cualquier otra calificación en esta Universidad o cualquier otra institución, esto ha sido claramente establecido.
- Cuando he consultado el trabajo publicado de otros, esto siempre se atribuye claramente.
- Donde he citado del trabajo de otros, la fuente siempre se ha dado. Con la excepción de tales citas, esta tesis es completamente mi propio trabajo.
- Reconocí todas las fuentes principales de ayuda.
- Cuando la tesis se basa en el trabajo hecho por mí mismo junto con otros, he dejado en claro exactamente lo que otros hicieron y lo que yo mismo aporté.

Firma:

---

Fecha:

---



*«Para mi familia: mis ideales, mi esfuerzo y mis logros también son suyos.»*

Dayana P.R.



## *Agradecimientos*

A mis padres, Guadalupe y Agustín, que en este logro vean reflejado el fruto de su cariño, apoyo y esfuerzo. Mi educación y valores son el mayor legado que he podido recibir y por el cual siempre les estaré infinitamente agradecida.

A mis hermanos, Lili y Adat, por ser mi compañía y cariño durante toda mi vida. Son parte de ésta y de cada una de mis metas.

A Mauricio, por toda la ayuda, paciencia y conocimientos puestos en esta tesis.

A mis amigos, por todo este tiempo juntos y apoyarme siempre.

A mis asesores, el Dr. Julio César Leal Vaca y el M.I. Francisco José Luna Rodríguez, por su interés en el desarrollo de este trabajo.

A mis sinodales, el Ing. Jorge Lucio Lerma Carmona, el M.C. Jesús Fernando Valdés Vázquez y el M. Saúl Villalobos Pérez, por el tiempo y la afinidad presentados en la evaluación de este trabajo.



# Índice general

<b>Declaración de Autoría</b>	<b>III</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>1. Marco teórico</b>	<b>1</b>
<b>2. Método de rigideces aplicado a marcos planos</b>	<b>3</b>
2.1. Consideraciones de análisis	3
2.2. Conceptos generales	3
2.3. Proceso de análisis	4
<b>3. Mecánica de suelos</b>	<b>9</b>
3.1. Propiedades de los suelos	9
3.2. Capacidad de carga	9
3.2.1. Capacidad de carga en estrato homogéneo	10
3.2.2. Capacidad de carga en suelo estratificado: estrato fuerte-estrato débil	10
3.3. Redistribución de esfuerzos por cargas excentricas	12
3.4. Asentamientos elásticos	14
3.4.1. Factor de forma de Steinbrenner	15
3.4.2. Factor de profundidad de Fox	15
3.5. Rigideces equivalentes del suelo	16
<b>4. Interacción suelo-estructura</b>	<b>19</b>
4.1. Diseño convencional	19
4.2. Diseño mediante interacción suelo-estructura	21
4.2.1. Mejoramiento del terreno de cimentación	23
4.2.2. Valores orientativos del suelo	25
<b>5. Programa de análisis</b>	<b>27</b>
5.0.1. Limitaciones	27
5.0.2. Uso del programa	27
5.0.3. Código principal	29
<b>6. Ejemplos</b>	<b>31</b>
6.0.1. Ejemplo 1	31
Resultados	32
6.0.2. Ejemplo 2	34
Resultados	35



# Índice de figuras

2.1. Sistemas de referencia de elemento barra . . . . .	6
3.1. Falla en sistema estrato fuerte-estrato débil . . . . .	10
3.2. Aumento de esfuerzos por relación 2:1 . . . . .	11
3.3. Coeficiente de corte por punzonamiento . . . . .	12
3.4. Distribución de esfuerzos por excentricidad . . . . .	13
3.5. Asentamiento en cimentación rígida . . . . .	14
3.6. Restricciones en zapata bidimensional, en el plano XZ . . . . .	16
4.1. Rigideces en sistema bicapa . . . . .	21
5.1. Numeración de elementos de estructura . . . . .	28
6.1. Marco, ejemplo 1 . . . . .	31
6.2. Geometría, ejemplo 1 . . . . .	32
6.3. Marco, ejemplo 2 . . . . .	34
6.4. Geometría, ejemplo 1 . . . . .	35
6.5. Dimensiones de cimentación, ejemplo 2 . . . . .	36
6.6. Espesor de cimentación, ejemplo 2 . . . . .	36
6.7. Capacidad de carga admisible, ejemplo 2 . . . . .	37
6.8. Esfuerzo máximo en cimentación, ejemplo 2 . . . . .	37
6.9. Esfuerzo mínimo en cimentación, ejemplo 2 . . . . .	38
6.10. Asentamientos en cimentación, ejemplo 2 . . . . .	38



# Índice de cuadros

2.1. Factor de forma para secciones tipo . . . . .	7
4.1. Asentamiento vertical máximo en elementos aislados según el tipo de suelo	20
4.2. Distorción máxima entre claros para marcos de concreto reforzado . . . . .	20
4.3. Distorción máxima entre claros para marcos de acero . . . . .	20
6.1. Dimensiones y esfuerzos en cimentación, ejemplo 1 . . . . .	32
6.2. Asentamientos en cimentación (cm), ejemplo 1 . . . . .	32
6.3. Propiedades mejoramientos, ejercicio 2 . . . . .	34
6.4. Dimensiones, esfuerzos y asentamientos, ejercicio 2 . . . . .	35
1. FACTORES DE CAPACIDAD DE CARGA DE TERZAGHI . . . . .	40



# Lista de Símbolos

$A_e$	Área transversal de los elementos barra de la estructura analizada	$cm^2$
$B'$	Ancho efectivo de zapata de cimentación, en un sistema de redistribución de esfuerzos	$cm$
$B$	Ancho de zapata de cimentación	$cm$
$b'$	Posición del asentamiento calculado en cimentación	Adimensional
$b$	Ancho de la fibra de análisis, en el cálculo del factor de forma de un elemento barra	$cm$
$c'$	Cohesión del suelo de cimentación	$Ton/cm^2$
$D_f$	Profundidad de desplante de cimentación	$cm$
$d$	Peralte efectivo de cimentación	$cm$
$E_e$	Módulo de elasticidad de los elementos de la estructura analizada	$Ton/cm^2$
$E_s$	Módulo de elasticidad del suelo de cimentación	$Ton/cm^2$
$e$	Excentricidad de cargas en cimentación	$cm$
$F_{Fy}$	Factor de forma de los elementos barra de la estructura analizada	Adimensional
$FR$	Factor de reducción por flexión y cortante	Adimensional
$FS$	Factor de seguridad en cimentación	Adimensional
$f'c$	Resistencia a la compresión simple de concreto	$Ton/cm^2$
$G_e$	Módulo de cortante de los elementos de la estructura analizada	$Ton/cm^2$
$G_s$	Módulo de cortante del suelo de cimentación	$Ton/cm^2$
$H$	Espesor efectivo del estrato de mejoramiento en un sistema de suelo bicapa	$cm$
$I_f$	Factor de profundidad de Fox	Adimensional
$I_s$	Factor de forma de Steinbrenner	Adimensional
$I_z$	Inercia de la sección transversal de los elementos barra de la estructura analizada	$cm^4$
$K_s$	Coefficiente de corte por punzonamiento en el suelo de cimentación	Adimensional
$K_v$	Rigidez vertical de cimentación	$Ton/cm$
$K_{ev}$	Rigidez vertical equivalente de cimentación en un suelo estratificado	$Ton/cm$
$K_x$	Rigidez horizontal de cimentación	$Ton/cm$
$K_{ry}$	Rigidez rotacional de cimentación	$Ton - cm$
$K_{ery}$	Rigidez rotacional equivalente de cimentación en un suelo estratificado	$Ton - cm$
$L$	Longitud de cimentación	$cm$

$L_e$	Longitud de elementos individuales en la estructura de análisis	$cm$
$l$	Seno de los elementos barra de la estructura analizada, con respecto al sistema global	$o$
$M$	Momento de diseño en cimentación	$Ton - cm$
$m$	Coseno de los elementos barra de la estructura analizada, con respecto al sistema global	$o$
$N_c, N_q, N_\gamma$	Coefficientes de Terzaghi para el cálculo de capacidad de carga	Adimensionales
$n$	Niveles de la estructura de análisis, para el cálculo de deformaciones permisibles	$cm$
$q_0$	Presión neta en cimentación	$Ton/cm^2$
$q_1$	Capacidad de carga última en el estrato superior de un sistema de suelo bicapa	$Ton/cm^2$
$q_2$	Capacidad de carga última en el estrato inferior de un sistema de suelo bicapa	$Ton/cm^2$
$q_{adm}$	Capacidad de carga admisible en cimentación	$Ton/cm^2$
$q_{max}$	Esfuerzo máximo en cimentación	$Ton/cm^2$
$q_{min}$	Esfuerzo mínimo en cimentación	$Ton/cm^2$
$q_u$	Capacidad de carga última en cimentación	$Ton/cm^2$
$Q$	Carga vertical de diseño en cimentación	$Ton$
$Q_z$	Primer momento de área, en el cálculo del factor de forma de un elemento barra	$cm^3$
$r_z$	Radio de giro, en el cálculo del factor de forma de un elemento barra	$cm^2/cm$
$S_e$	Asentamiento elástico en cimentación rígida	$cm$
$V$	Cortante de diseño en cimentación	$Ton$
$V_{cr}$	Cortante de crítico en cimentación	$Ton$
$x$	Distancia de claros en la estructura de análisis, para el cálculo de distorsiones permisibles	$cm$
$\gamma$	Peso volumétrico del suelo de cimentación	$Ton/cm^3$
$\phi$	Ángulo de fricción del suelo de cimentación	Adimensional
$\phi_y$	Factor de cortante diferido de los elementos de la estructura analizada	Adimensional
$\mu_s$	Módulo de Poisson del suelo de cimentación	Adimensional
$\nu_e$	Módulo de Poisson de los elementos barra de la estructura de análisis	Adimensional
$\{F\}$	Vector de fuerzas internas globales en el análisis matricial de la estructura revisada	$Ton, cm$
$\{f\}$	Vector de fuerzas internas locales en el análisis matricial de la estructura revisada	$Ton, cm$
$\{F_e\}$	Vector de fuerzas externas globales en el análisis matricial de la estructura revisada	$Ton, cm$
$\{F_\delta\}$	Vector de fuerzas por desplazamientos prescritos en el análisis matricial de la estructura revisada	$Ton, cm$

$\{R_e\}$	Vector de reacciones globales en el análisis matricial de la estructura revisada	$Ton, cm$
$\{\delta\}$	Vector de desplazamientos prescritos en el análisis matricial de la estructura revisada	$cm$
$\{\Delta\}$	Vector de desplazamientos globales en el análisis matricial de la estructura revisada	$cm$
$[K]$	Matriz de rigidez en sistema global	$Ton, cm$
$[R]$	Matriz de rotación de fuerzas	$\circ$



*Dedicado a mi familia*



## Capítulo 1

# Marco teórico

Autores como Samuel Chamecki, Flores Victoria, Esteva y Demeneghi han propuesto diversos sistemas para la solución del problema suelo-estructura. Los métodos usados abarcan desde complejos sistemas numéricos que relacionan ecuaciones de equilibrio y distribución de presiones, hasta el cálculo de rigideces por medio de las cargas aplicadas y los asentamientos producidos en la estructura.

En este trabajo se ha considerado la compatibilidad entre el suelo y estructura, en condiciones de cargas estáticas, mediante el cálculo de las rigideces aportadas por la cimentación. La rigidez considerada es la propuesta por Pais y Kausel (1985,1988) para un elemento bidimensional en el plano XZ y depende del módulo de Poisson, módulo de elasticidad, módulo de cortante y dimensiones del elemento propuesto. Además se propone una comparativa con un diseño convencional, en el cual se obtienen los asentamientos en la estructura, para después ser utilizados en la determinación de la sección de cimentación.

También se analiza el caso del uso de mejoramientos en suelos de baja calidad, se han propuesto como materiales sugeridos los correspondientes a las normativas SCT para terracerías y pavimentos, pues suelen ser los más utilizados para este fin.



## Capítulo 2

# Método de rigideces aplicado a marcos planos

Para solventar la obtención de los elementos mecánicos de diseño en la cimentación se seleccionó este método, dada su facilidad de programación y porque es utilizado en el análisis de estructuras estáticas e hiperestáticas. El análisis parte de la división de una estructura en sus elementos barra, con la finalidad de establecer una relación de equilibrio entre las fuerzas aplicadas y los desplazamientos que producen en los nodos.

### 2.1. Consideraciones de análisis

#### 1. Equilibrio

Una estructura se encuentra en equilibrio si todos sus elementos permanecen estáticos cuando se sujetan a un sistema de fuerzas.

#### 2. Condiciones de continuidad

Establecen que, ante deformaciones, los miembros de una estructura se unen entre sí, sin huecos ni superposiciones. De esta manera se asegura que la estructura deformada sea continua y consistente en nodos y condiciones de apoyo.

#### 3. Relaciones esfuerzo deformación

Describen la relación entre los esfuerzos y deformaciones de una estructura, acorde a las propiedades de los materiales que la conforman.

### 2.2. Conceptos generales

- Nodos: Señalan los extremos de un elemento barra, también sirven como conexión entre dos o más miembros de una estructura o bien como puntos de aplicación de acciones externas, tales como cargas y desplazamientos.
- Elementos barra: Son la mínima unidad que conforma un marco. Se encuentran sujetos a cargas.
- Sistema de referencia global: Determina la posición de los nodos de una estructura, el sentido de sus barras y cargas aplicadas con respecto a una misma referencia arbitraria.

- Sistema de referencia local: Es establecido para cada una de las barras de la estructura. El eje X se dirige en sentido longitudinal, partiendo del nodo inicial al final. Los ejes Y y Z se referencian en un sentido coordenado derecho.
- Matriz de rotación: Establece una relación entre los sistemas global y local de una estructura permitiendo, mediante su uso, el acoplamiento de fuerzas y desplazamientos de un sistema de referencia a otro.
- Grado de libertad: Son los desplazamientos y rotaciones que un nodo puede realizar.

### 2.3. Proceso de análisis

A continuación se describe el proceso de cálculo para la obtención de fuerzas y desplazamientos en un marco bidimensional sin y con desplazamientos prescritos:

- Establecimiento de sistema de referencia global
- Determinación de geometría  
Se establece la ubicación y propiedades de nodos y barras
- Grados de libertad  
Se identifican y registran los grados de libertad en las barras de la estructura.
- Vector de desplazamientos en nodos  
Debe considerarse que al existir un desplazamiento prescrito en alguno de los nodos, éste suprime al grado de libertad existente en la dirección del desplazamiento aplicado, es decir:
  - Un desplazamiento vertical, suprime un grado de libertad vertical
  - Un desplazamiento horizontal, suprime un grado de libertad horizontal
  - Una giro prescrito, suprime un grado de libertad rotacional
- Vector de rigideces en nodos  
En el caso de que alguno de los nodos en la estructura esté sometido a una rigidez finita, debe considerarse un grado de libertad en función de la rigidez aplicada, es decir:
  - Una rigidez vertical, corresponde a un grado de libertad vertical
  - Una rigidez horizontal, corresponde a un grado de libertad horizontal
  - Una rigidez helicoidal, corresponde a un grado de libertad rotacional
- Vector de fuerzas por empotramiento perfecto  
Se determinan los momentos de empotramiento provenientes de las barras sometidas a cargas externas y se ensamblan las cargas correspondientes a los nodos que corresponden a los grados de libertad de análisis
- Vector de fuerzas externas  
Se consideran las fuerzas aplicadas de manera directa en nodos

■ Matriz de rigidez para elementos aislados

Para cada barra se consideran 3 grados de libertad en cada extremo: desplazamiento vertical, desplazamiento horizontal y rotación. En el análisis se consideran los efectos del cortante en los miembros.

La matriz de rigidez de un elemento barra contiene los siguientes elementos:

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ K_{ji} & K_{jj} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Siendo los coeficientes:

$$K_{ii} = \begin{bmatrix} \frac{E_e A_e}{L_e} l^2 + \frac{12E_e I_z}{(\varphi_y) L_e^3} m^2 & \left( \frac{E_e A_e}{L_e} - \frac{12E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^3} \right) l m & -\frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} m \\ \left( \frac{E_e A_e}{L_e} - \frac{12E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^3} \right) l m & \frac{E_e A_e}{L_e} m^2 + \frac{12E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^3} l^2 & \frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} l \\ -\frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} m & \frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} l & \frac{(4+\varphi_y) E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} -\frac{E_e A_e}{L_e} l^2 + \frac{12E_e I_z}{(\varphi_y) L_e^3} m^2 & -\left( \frac{E_e A_e}{L_e} - \frac{12E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^3} \right) l m & -\frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} m \\ -\left( \frac{E_e A_e}{L_e} - \frac{12E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^3} \right) l m & -\frac{E_e A_e}{L_e} m^2 + \frac{12E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^3} l^2 & \frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} l \\ -\frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} m & -\frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} l & \frac{(2-\varphi_y) E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$K_{ji} = \begin{bmatrix} -\frac{E_e A_e}{L_e} l^2 + \frac{12E_e I_z}{(\varphi_y) L_e^3} m^2 & -\left( \frac{E_e A_e}{L_e} - \frac{12E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^3} \right) l m & \frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} m \\ -\left( \frac{E_e A_e}{L_e} - \frac{12E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^3} \right) l m & -\frac{E_e A_e}{L_e} m^2 + \frac{12E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^3} l^2 & -\frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} l \\ -\frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} m & \frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} l & \frac{(4+\varphi_y) E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$K_{jj} = \begin{bmatrix} \frac{E_e A_e}{L_e} l^2 + \frac{12E_e I_z}{(\varphi_y) L_e^3} m^2 & \left( \frac{E_e A_e}{L_e} - \frac{12E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^3} \right) l m & \frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} m \\ \left( \frac{E_e A_e}{L_e} - \frac{12E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^3} \right) l m & \frac{E_e A_e}{L_e} m^2 + \frac{12E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^3} l^2 & -\frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} l \\ \frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} m & -\frac{6E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e^2} l & \frac{(4+\varphi_y) E_e I_z}{(1+\varphi_y) L_e} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$K_{ii}$  indica la rigidez del nodo inicial,  $K_{ij}$  la rigidez del nodo inicial con respecto al final,  $K_{ji}$  rigidez del nodo final con respecto al inicial y  $K_{jj}$  rigidez del nodo final.

$l$  y  $m$  corresponden al coseno y al seno del elemento barra, con respecto al sistema de referencia global.

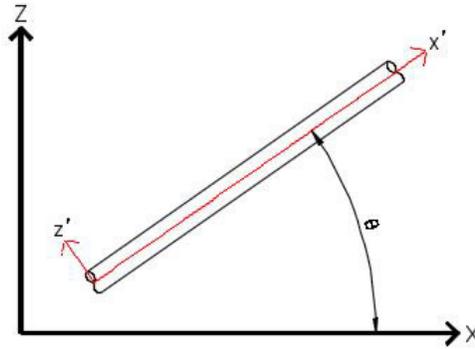


FIGURA 2.1: Sistemas de referencia de elemento barra

$\varphi_y$  es el factor de rigidez por cortante del elemento, estimado por la relación:

$$\varphi_y = \frac{12E_e I_z F_{Fy}}{L_e G_e A_e} \quad (2.6)$$

Donde:

- $E_e$  = Módulo de elasticidad del elemento barra
- $G_e$  = Módulo de cortante del elemento barra

$$G = \frac{E_e}{2(1 + \nu_e)} \quad (2.7)$$

En el caso de que el material del elemento sea concreto, puede usarse un valor aproximado de  $G = 0,4E_e$

- $I_z$  = Inercia del elemento barra al rededor del eje Z (vertical)
- $L_e$  = Longitud del elemento barra
- $A_e$  = Área transversal del elemento barra
- $F_{Fy}$  = Factor de forma de la sección  
Establece una relación de la distribución de los esfuerzos cortantes a lo largo de una sección

$$F_{Fy} = \int_A \frac{Q_z^2}{r_z^2 I_z b^2} dA \quad (2.8)$$

Donde:

- $Q_z$  = Primer momento de área parcial, a partir de la fibra analizada
- $b$  = Ancho de la fibra analizada

- o  $r_z =$  Radio de giro de la sección

Para practicidad del cálculo pueden considerarse los siguientes valores:

Secciones rectangulares o triangulares	1.2
Secciones circulares	$\frac{10}{9}$
Perfiles I ó H sometidos a cargas paralelas al alma	$\frac{\text{Áreatotaldelsección}}{\text{Áreadelalma}}$
Perfiles I ó H sometidos a cargas paralelas a los patines	$\frac{\text{Áreatotaldelsección}}{\text{Áreadelospatines}}$

CUADRO 2.1: Factor de forma para secciones tipo

#### ■ Vector de fuerzas del sistema

La diferencia en el proceso de cálculo de un marco con desplazamientos prescritos y un marco sin desplazamientos, consiste en la determinación de las fuerzas en el sistema. En el caso de no existir desplazamientos prescritos, el vector de fuerzas comprende las fuerzas externas en nodos y fuerzas por empotramiento perfecto, si existen desplazamientos prescritos se añaden las fuerzas por desplazamientos. De esta manera el vector de fuerzas a considerar es:

- Para marcos simples

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} Fe_y \\ Fe_x \\ Me_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} FMEP_x \\ FMEP_y \\ MMEP_z \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

- Para marcos con desplazamientos prescritos

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} Fe_y \\ Fe_x \\ Me_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} FMEP_x \\ FMEP_y \\ MMEP_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F\delta_y \\ F\delta_x \\ M\delta_z \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

Para el cálculo de las fuerzas por desplazamientos, se acoplan los grados de libertad de la estructura junto al desplazamiento prescrito, la matriz resultante es multiplicada con el vector de desplazamientos conocidos, resultando las reacciones en la estructura:

$$[K] \{\delta\} = \{R_e\} \quad (2.11)$$

Para obtener las acciones en la estructura, es necesario invertir los signos del vector anterior:

$$\{F\} = -\{R_e\} \quad (2.12)$$

#### ■ Cálculo de desplazamientos

Una vez establecidos los componentes del vector de fuerzas, se procede al cálculo de desplazamientos, debidos a acciones, en el sistema.

- En caso de no existir desplazamientos prescritos

$$[K^{-1}] \{F\} = \{\Delta\} \quad (2.13)$$

- En caso de existir desplazamientos prescritos

$$[K^{-1}] \{F\} + \{\delta\} = \{\Delta\} \quad (2.14)$$

La matriz de rigidez involucrada incluye únicamente a los grados de libertad no restringidos de la estructura.

■ Fuerzas en los nodos

- Fuerzas en sistema global

Las fuerzas en sistema global se obtienen mediante las matrices de rigidez individuales, éstas son multiplicadas por los desplazamientos calculados previamente (correspondientes a cada nodo).

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ K_{ji} & K_{jj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_{xi} \\ \Delta_{yi} \\ \theta_i \\ \Delta_{xj} \\ \Delta_{yj} \\ \theta_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} FMEP_{xi} \\ FMEP_{yi} \\ MMEP_i \\ FMEP_{xj} \\ FMEP_{yj} \\ MMEP_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ M_i \\ F_{xj} \\ F_{yj} \\ M_j \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

- Fuerzas en sistema local

Las fuerzas en sistema local son obtenidas mediante la rotación de las fuerzas en sistema global.

$$[R]^T \{F\} = \{f\} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ M_i \\ F_{xj} \\ F_{yj} \\ M_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{xi} \\ f_{yi} \\ m_i \\ f_{xj} \\ f_{yj} \\ m_j \end{Bmatrix} \quad (2.17)$$

## Capítulo 3

# Mecánica de suelos

### 3.1. Propiedades de los suelos

Se enlistan y describen las propiedades índice de los suelos, usadas en la determinación de capacidades de carga y deformaciones.

- **Peso volumétrico**  
Define la cantidad de masa ocupada por el suelo en una unidad de volumen [ $\gamma$ ].
- **Cohesión**  
Es una propiedad única de las arcillas, señala la fuerza de atracción que existe entre las partículas que conforman el suelo [ $c'$ ].
- **Ángulo de fricción**  
Es una propiedad única de las arenas y limos, indica el ángulo de reposo de un suelo [ $\phi$ ].
- **Módulo de elasticidad**  
Señala la relación esfuerzo-deformación del material, proporcionando una medida de su capacidad para resistir deformaciones y mantenerse en un comportamiento elástico ante la acción de cargas. Un módulo alto indica un material rígido y uno bajo un material flexible [ $E_s$ ].
- **Módulo de Poisson**  
Proporciona la relación existente entre las deformaciones transversales y longitudinales de una sección ante una carga axial [ $\mu_s$ ].
- **Módulo de cortante**  
Define la relación entre fuerzas cortantes y las deformaciones paralelas a las mismas [ $G_s$ ].

### 3.2. Capacidad de carga

Para la determinación de las dimensiones en planta de las zapatas se consideran dos casos: en el primero el suelo es un estrato homogéneo y en el segundo el suelo es sometido a un mejoramiento mediante un estrato fuerte.

### 3.2.1. Capacidad de carga en estrato homogéneo

La capacidad de carga será determinada mediante la teoría de Terzaghi, para cimentaciones cuadradas

$$q_u = 1,3c'N_c + \gamma D_f N_q + 0,4\gamma B N_\gamma \quad (3.1)$$

Donde:

- $c'$  = Cohesión del suelo
- $\gamma_s$  = Peso volumétrico del suelo
- $D_f$  = Profundidad de desplante del elemento de cimentación
- $B$  = Ancho del elemento de cimentación
- $N_c, N_q, N_\gamma$  = Factores de capacidad de carga de Terzaghi, son adimensionales y dependen únicamente del ángulo de fricción del terreno de cimentación (Tabla 1).

Una vez obtenida la capacidad de carga última  $q_u$  se obtiene, mediante un factor de seguridad  $FS$ , la capacidad de carga admisible para el suelo analizado y la cimentación propuesta. Se sugiere usar un factor de seguridad de 3.

$$q_{adm} = \frac{q_u}{FS} \quad (3.2)$$

### 3.2.2. Capacidad de carga en suelo estratificado: estrato fuerte-estrato débil

Se considera que el espesor del estrato fuerte (mejoramiento) es lo suficientemente pequeño para trabajar en conjunto con el estrato inferior (estrato débil), considerando este comportamiento, el primer estrato estará sometido a una falla por punzonamiento y el segundo a una falla general, como se muestra en la figura.

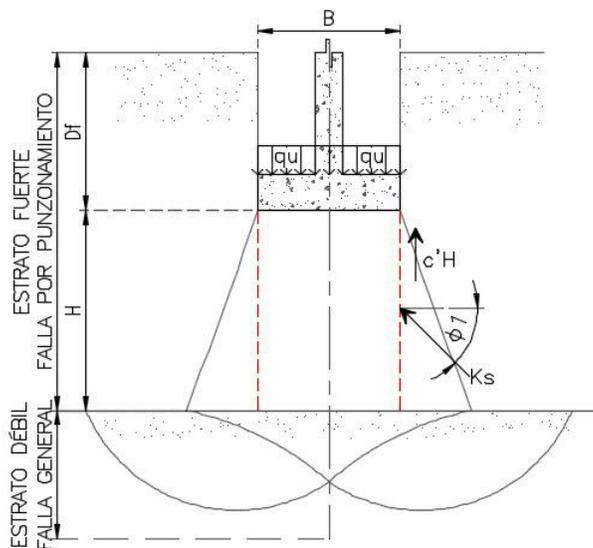


FIGURA 3.1: Falla en sistema estrato fuerte-estrato débil

En este sistema la capacidad de carga está determinada por

$$q_u = q_2 + \frac{2c'_1 H}{B} + \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) \frac{K_s \tan \phi'_1}{B} - \gamma_1 H \quad (3.3)$$

Donde:

- $q_2$  = Capacidad de carga del estrato inferior  
Para fines de cálculo se considera que los esfuerzos del estrato superior al inferior se transmiten en una proporción de 2:1, por lo cual esta capacidad de carga es determinada considerando una dimensión de  $B + H$  como zona de contacto en el estrato inferior.

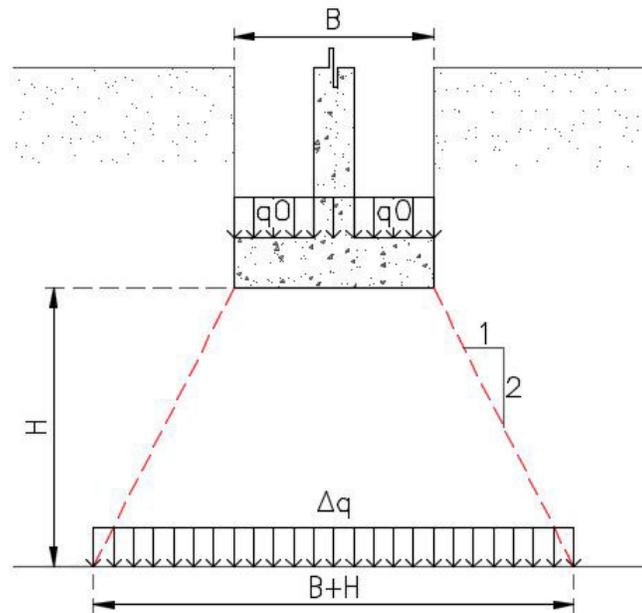


FIGURA 3.2: Aumento de esfuerzos por relación 2:1

- $c'_2$  = Cohesión del estrato superior
- $H$  = Espesor efectivo del estrato de mejoramiento
- $B$  = Ancho del elemento de cimentación
- $\gamma_1$  = Peso volumétrico del estrato de mejoramiento
- $D_f$  = Profundidad de desplante del elemento de cimentación
- $\phi'_1$  = Ángulo de fricción del estrato de mejoramiento
- $K_s$  = Coeficiente de corte por punzonamiento, este factor varia en función de la relación

$$K_s = f \left( \frac{q_2}{q_1}, \phi'_1 \right) \quad (3.4)$$

$q_1$  y  $q_2$  son las capacidades de carga últimas de los estratos individuales, al considerarse infinitos.

$$q_1 = c'_1 N_{c(1)} + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma_1} \quad (3.5)$$

$$q_2 = c'_2 N_{c(2)} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma_2} \quad (3.6)$$

La relación  $K_s$  se muestra a continuación.

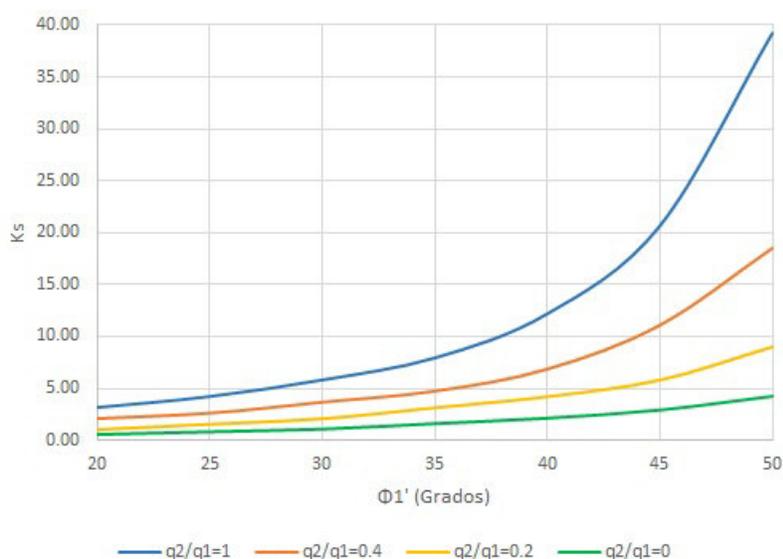


FIGURA 3.3: Coeficiente de corte por punzonamiento

### 3.3. Redistribución de esfuerzos por cargas excéntricas

Ya que en las cargas de diseño se considerarán los efectos del cortante y momento en los apoyos, se aborda el caso en que la distribución de esfuerzos en el suelo no es uniforme, presentándose tensiones en el elemento de cimentación.

Un sistema de fuerzas  $Q$  y  $M$  puede ser sustituido por una fuerza  $P$  sometida a una excentricidad  $e$ , donde

$$e = \frac{M}{Q} \quad (3.7)$$

Siendo la distribución de esfuerzos para una zapata cuadrada bidimensional

$$q_{min} = \frac{P}{B^2} \left( 1 - \frac{6e}{B} \right) \quad (3.8)$$

$$q_{max} = \frac{P}{B^2} \left( 1 + \frac{6e}{B} \right) \quad (3.9)$$

A partir de las ecuaciones anteriores

- Cuando  $e = \frac{B}{6}$ , el esfuerzo en la cimentación es cero y el área de la zapata se encuentra totalmente en contacto con el suelo.

- Cuando  $e > \frac{B}{6}$ , se producen tensiones en la cimentación, por lo cual el área de contacto entre la cimentación y el suelo disminuye.

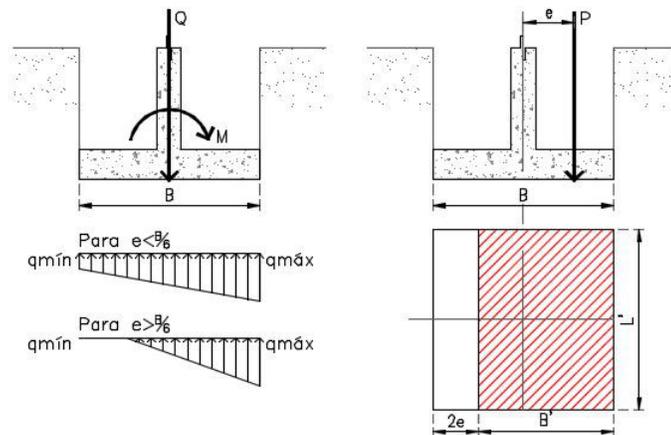


FIGURA 3.4: Distribución de esfuerzos por excentricidad

Considerando una distribución de esfuerzos en la cual se presenten tensiones, el esfuerzo mínimo corresponderá a cero y el problema se limita al cálculo del esfuerzo máximo en el elemento.

Suponiendo que la reacción por parte del suelo y la carga aplicada tienen la misma magnitud, puede establecerse una relación con base en su ubicación, donde  $B'$  corresponde al ancho efectivo (en compresión) del elemento de cimentación.

$$\frac{1}{2}B - e = \frac{1}{3}B' \quad (3.10)$$

$$B' = 3 \left( \frac{1}{2}B - e \right) \quad (3.11)$$

Ya que las magnitudes son iguales, la carga  $Q$  puede igualarse al volumen de los esfuerzos en la zona de compresión de la zapata:

$$P = R_s \quad (3.12)$$

$$P = \frac{1}{2}B'q_{max}B \quad (3.13)$$

$$P = \frac{1}{2}3 \left( \frac{1}{2}B - e \right) q_{max}B \quad (3.14)$$

$$q_{max} = \frac{2P}{3B \left( \frac{1}{2}B - e \right)} \quad (3.15)$$

$$q_{max} = \frac{4P}{3B(B - 2e)} \quad (3.16)$$

### 3.4. Asentamientos elásticos

Se considera que la cimentación diseñada es rígida y que las propiedades del suelo son obtenidas en una profundidad de hasta cinco veces el ancho propuesto en la cimentación.

$$S_e = 0,93q_o (\alpha b') \frac{1 - \mu^2}{E} I_s I_f \quad (3.17)$$

Donde:

- $q_o$  = Presión neta en la cimentación
- $\mu_s$  = Relación de Poisson del suelo
- $E_s$  = Módulo de elasticidad del suelo.

Debido a la naturaleza no homogénea de los suelos, el módulo puede ponderarse mediante la siguiente ecuación, propuesta por Bowles (1987):

$$E_s = \frac{\sum E_i \Delta z}{\bar{z}} \quad (3.18)$$

- $E_i$  = Módulo de elasticidad del suelo a una profundidad  $\Delta z$
- $\bar{z}$  = La menor magnitud entre el espesor del estrato o cinco veces el ancho de la cimentación.
- $b'$  = Posición del asentamiento (1/2 para centro de cimentación)
- $\alpha = 4$ , para el centro de la cimentación
- $I_s$  = Factor de forma de Steinbrenner
- $I_f$  = Factor de profundidad

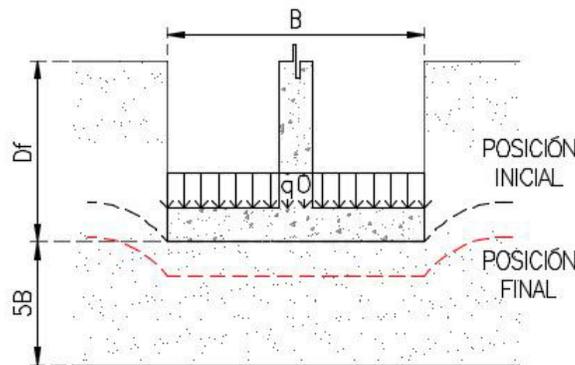


FIGURA 3.5: Asentamiento en cimentación rígida

### 3.4.1. Factor de forma de Steinbrenner

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu} F_2 \quad (3.19)$$

Siendo los factores  $F_1$  Y  $F_2$ :

$$F_1 = \frac{1}{\pi} (A_0 + A_1) \quad (3.20)$$

$$F_2 = \frac{n'}{2\pi} \tan^{-1} A_2 \quad (3.21)$$

Donde los coeficientes  $A_0$ ,  $A_1$  y  $A_2$  se determinan mediante:

$$m' = \frac{L}{B} \quad (3.22)$$

$$n' = \frac{H}{\frac{B}{2}} \quad (3.23)$$

$$A_0 = m' \ln \frac{(1 + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{m'^2 + n'^2}}{m' (1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1})} \quad (3.24)$$

$$A_1 = \ln \frac{(m' + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} \quad (3.25)$$

$$A_2 = \frac{m'}{n' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} \quad (3.26)$$

### 3.4.2. Factor de profundidad de Fox

$$I_F = \frac{\sum_{i=1}^{i=5} \beta_i Y_i}{(\beta_1 + \beta_2) Y_1} \quad (3.27)$$

Donde los coeficientes  $\beta_i$  corresponden a:

$$\beta_1 = 3 - 4\mu_s \quad (3.28)$$

$$\beta_2 = 5 - 12\mu_s + 8\mu_s^2 \quad (3.29)$$

$$\beta_3 = -4\mu_s (1 - 2\mu_s) \quad (3.30)$$

$$\beta_4 = -1 + 4\mu_s - 8\mu_s^2 \quad (3.31)$$

$$\beta_5 = -4 (1 - 2\mu_s)^2 \quad (3.32)$$

Los coeficientes  $Y_i$  son calculados a partir de las ecuaciones:

$$Y_1 = L \ln \left( \frac{R_4 + B}{L} \right) + B \cdot \ln \left( \frac{R_4 + L}{B} \right) - \frac{R_4^3 - L^3 - B^3}{3LB} \quad (3.33)$$

$$Y_2 = L \ln \left( \frac{R_3 + B}{R_1} \right) + B \ln \left( \frac{R_3 + L}{R_2} \right) - \frac{R_3^3 - R_2^3 - R_1^3 + R^3}{3LB} \quad (3.34)$$

$$Y_3 = \frac{R^2}{L} \ln \left[ \frac{(B + R_2) R_1}{(B + R_3) R} \right] + \frac{R^2}{B} \ln \left[ \frac{(L + R_1) R_2}{(L + R_3) R} \right] \quad (3.35)$$

$$Y_4 = \frac{R^2 (R_1 + R_2 - R_3 - R)}{LB} \quad (3.36)$$

$$Y_3 = R \tan^{-1} \left( \frac{LB}{RR_3} \right) \quad (3.37)$$

Finalmente, los coeficientes  $R_i$  se obtienen mediante las relaciones:

$$R = 2D \quad (3.38)$$

$$R_1 = \sqrt{L^2 + R^2} \quad (3.39)$$

$$R_2 = \sqrt{B^2 + R^2} \quad (3.40)$$

$$R_3 = \sqrt{L^2 + B^2 + R^2} \quad (3.41)$$

$$R_4 = \sqrt{L^2 + B^2} \quad (3.42)$$

### 3.5. Rigideces equivalentes del suelo

Una zapata de cimentación bidimensional se encuentra sometida a las siguientes restricciones, como se ilustra en la figura.

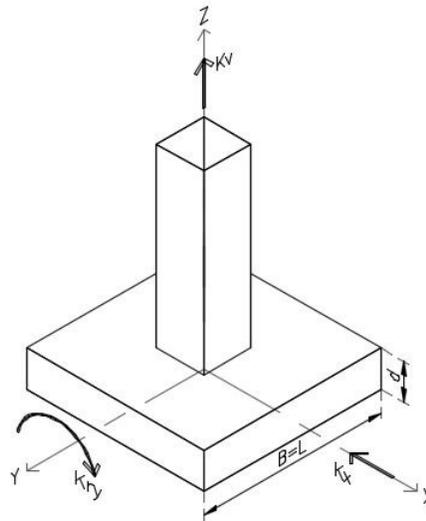


FIGURA 3.6: Restricciones en zapata bidimensional, en el plano XZ

- $K_v$  = Rigidez equivalente en dirección vertical
- $K_x$  = Rigidez equivalente en dirección horizontal
- $K_{ry}$  = Rigidez equivalente en rotación con respecto al eje Y

Se presentan los coeficientes de rigidez, correspondientes a cargas estáticas en cimentaciones enterradas, propuestos por Pais y Kausel (1985,1988)

$$K_v = \frac{G_s B}{1 - \mu} [3,1\lambda^{0,75} + 1,6] [1 + (0,25 + 0,25/\lambda)\eta^{0,8}] \quad (3.43)$$

$$K_x = \frac{G_s B}{1 - \mu} [6,8\lambda^{0,65} + 2,4] [1 + \{0,33 + 1,34/(1 + \lambda)\}\eta^{0,8}] \quad (3.44)$$

$$K_{ry} = \frac{G_s B^3}{1 - \mu} [3,73\lambda^{2,4} + 0,27] \left[ 1 + \eta + 1,6 / (0,35 + \lambda^4) \right] \eta^2 \quad (3.45)$$

Donde:

- $G_s$  = Módulo de cortante del suelo
- $\mu$  = Módulo de Poisson del suelo
- $L$  = Longitud de la zapata
- $B$  = Ancho de la zapata
- $\lambda$  = Cociente dimensional

$$\lambda = L/B \quad (3.46)$$

- $\eta$  = Cociente de profundidad

$$\eta = d/B \quad (3.47)$$



## Capítulo 4

# Interacción suelo-estructura

En el diseño de cimentaciones es común la idealización del suelo como un medio de rigidez infinita, de esta manera se obtienen los elementos mecánicos de diseño para posteriormente calcular las secciones destinadas a soportar la estructura.

La interacción suelo-estructura realiza un análisis tomando en cuenta el efecto de la rigidez (finita) del terreno de cimentación en la obtención de las cargas de diseño de la estructura, teniendo como finalidad un diseño racional de los elementos. Este método es principalmente aplicable a suelos de mediana a alta compresibilidad.

En este caso de estudio se han considerado y comparado los resultados de dos procedimientos de diseño para zapatas aisladas y se ha limitado el análisis a marcos estructurales cimentados mediante zapatas aisladas centrales.

### 4.1. Diseño convencional

Se consideró como base de comparativa el procedimiento usado comunmente en el diseño de zapatas en suelos compresibles, en el cual se supone a la estructura apoyada mediante empotramientos, el proceso de cálculo se describe a continuación:

- Determinación de cargas iniciales para diseño, considerando a la estructura empotrada en los apoyos.
- Dimensionamiento de zapata en planta, a partir de la capacidad de carga del terreno.  
En este apartado se evalúa la cantidad de estratos del suelo de cimentación, la capacidad de carga puede ser determinada para un estrato homogéneo o un estrato bicapa (mejoramiento del terreno).
- Cálculo de asentamientos a partir de dimensiones iniciales del elemento.
- Determinación de cargas finales de diseño, añadiendo al sistema estructural los asentamientos calculados en el paso anterior.
- Evaluación de dimensiones iniciales para cargas finales.  
En caso de que las dimensiones no sean suficientes para las cargas estimadas, la cimentación será redimensionada.

- Evaluación de comportamiento

Los asentamientos presentes en la cimentación serán acotados a las siguientes consideraciones:

1. Movimientos individuales

Los asentamientos verticales en la zapata serán limitados a lo propuesto por Skempton y McDonald (1956):

El límite para suelos cohesivo-friccionantes se ha determinado por promedio.

Suelo friccionante	3.2cm
Suelo cohesivo	4.5cm
Suelo cohesivo-friccionante	3.85cm

CUADRO 4.1: Asentamiento vertical máximo en elementos aislados según el tipo de suelo

2. Distorsión entre claros

Los movimientos entre extremos de claros, se limitarán acorde a lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México:

Hasta cuatro niveles	0.004x
Cuatro a catorce pisos	0.004(1.255-0.0636n)
Quince a más pisos	0.0012x

CUADRO 4.2: Distorsión máxima entre claros para marcos de concreto reforzado

Hasta cuatro niveles	0.006
Cuatro a catorce pisos	0.006(1.255-0.0636n)
Quince a más pisos	0.0018

CUADRO 4.3: Distorsión máxima entre claros para marcos de acero

$x$  = Distancia entre claros y  $n$  = Número de niveles

- Espesor de zapata

El peralte del elemento se calcula como elemento ancho, acorde a las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México:

- Cortante Crítico

El peralte efectivo de la sección está definido por la relación:

$$d = \frac{M}{2V} \quad (4.1)$$

Donde:

- $d$  = Peralte efectivo de la zapata
- $M$  = Momento de diseño

- $V =$  Cortante de diseño

El peralte se limitará a ser menor a 60cm y se asegurará que  $B < 4d$ . Una vez determinado, el cortante crítico corresponde a:

$$V_{cr} = 0,5F_R\sqrt{f'c}Bd \quad (4.2)$$

Donde:

- $V_{cr} =$  Cortante crítico para la zapata
- $F_R =$  Factor de reducción, 0.65 para transmisión de flexión y cortante
- $f'c =$  Resistencia a la compresión simple del concreto
- $B =$  Ancho de la zapata
- Cortante último  
El cortante último será determinado a una distancia  $d$  del borde del dado en la zapata.
- Espesor total  
Una vez determinado el peralte efectivo de la zapata, éste se aumentará 5cm para asegurar el recubrimiento del acero en la sección.

## 4.2. Diseño mediante interacción suelo-estructura

El proceso de cálculo consta de los siguientes pasos:

- Cálculo de rigideces del suelo.  
Se consideran dimensiones iniciales que permitan estimar la rigidez proporcionada por las zapatas. En el caso de que el suelo sea un sistema bicapa, las rigideces a considerar corresponderán a un sistema en serie de resortes, cuya distribución se presenta en la siguiente ilustración:

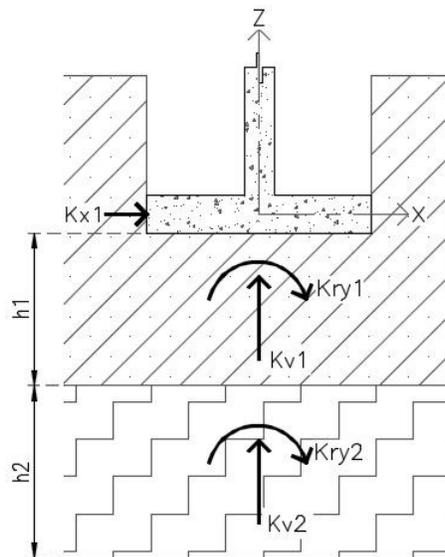


FIGURA 4.1: Rigideces en sistema bicapa

- Rigidez vertical

$$K_{ev} = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{k_{v1}} + \frac{h_2}{k_{v2}}} \quad (4.3)$$

Donde:

- $K_{ev}$  = Rigidez equivalente vertical del sistema estratificado
- $h_1$  = Espesor del primer estrato
- $h_2$  = Espesor del segundo estrato. En el caso de que el segundo estrato se considere infinito, se recomienda que el espesor considerado sea igual a 5 veces el ancho propuesto de la cimentación
- $k_{v1}$  = Rigidez vertical del primer estrato
- $k_{v2}$  = Rigidez vertical del segundo estrato

- Rigidez rotacional

$$K_{ery} = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{k_{ry1}} + \frac{h_2}{k_{ry2}}} \quad (4.4)$$

Donde:

- $K_{ery}$  = Rigidez equivalente rotacional del sistema estratificado, alrededor del eje Y.
- $h_1$  = Espesor del primer estrato.
- $h_2$  = Espesor del segundo estrato. En el caso de que el segundo estrato se considere infinito, se recomienda que el espesor considerado sea igual a 5 veces el ancho propuesto de la cimentación.
- $k_{ry1}$  = Rigidez rotacional del primer estrato alrededor del eje Y.
- $k_{ry2}$  = Rigidez rotacional del segundo estrato alrededor del eje Y.

- Análisis matricial

Las rigideces provenientes del suelo, se consideran como resortes en los nodos de la estructura conectados a las zapatas.

- Redimensionamiento de zapata en planta

Acorde a las cargas del análisis matricial y, en caso de ser necesario, se obtienen nuevas dimensiones para la cimentación. Si las dimensiones se modifican, se repetirá el análisis matricial y se volverán a evaluar las dimensiones del elemento.

- Evaluación de asentamientos

Considerando las deformaciones provenientes del análisis matricial se evalúan las limitaciones de los asentamientos, ver tablas 4.1, 4.2 y 4.3. En caso de que los asentamientos no se encuentren en los rangos permisibles, se modificarán las dimensiones de la zapata hasta que sean adecuados.

### 4.2.1. Mejoramiento del terreno de cimentación

Dentro del análisis se consideró la posibilidad de que el suelo fuera un sistema estratificado, teniendo como componentes al terreno natural y una capa de mejoramiento, los procedimientos de cálculo se presentan en el apartado de mecánica de suelos.

Se propone que el mejoramiento del suelo se realice por sustitución del material de terreno natural y que el material colocado corresponda a materiales calidad terracería y calidad pavimento, cuyas características se describen a continuación y corresponden a las señaladas en las normativas SCT:

- Materiales calidad terracería  
Representan la opción más económica para el mejoramiento.

#### 1. Terraplén

Son fragmentos de roca y suelos producidos por cortes o extracción de bancos.

Característica	Valor
Límite líquido (% máximo)	50
Valor de soporte de California <sup>a</sup> (% mínimo)	5
Expansión (% máximo)	5
Grado de compactación <sup>b</sup> (%)	90 ± 2

<sup>a</sup>Para especímenes compactados dinámicamente al porcentaje señalado en esta tabla, con un contenido de agua igual al óptimo.

<sup>b</sup>Con respecto a masa volumétrica seca máxima obtenida mediante prueba AASHTO Estándar con humedad óptima.

Para mayores especificaciones en la calidad del material, consultar el manual N-CMT-1-01/16

#### 2. Subrasante

Son suelos naturales, seleccionados o cribados, producidos por cortes o extracciones de bancos.

Característica	Valor
Tamaño máximo de agregado (mm)	76
Límite líquido (% máximo)	40
Índice plástico (% máximo)	12
Valor de soporte de California CBR <sup>a</sup> (% mínimo)	20
Expansión máxima (%)	2
Grado de compactación <sup>b</sup> (%)	100 ± 2

<sup>a</sup>Para especímenes compactados dinámicamente al porcentaje señalado en esta tabla, con un contenido de agua igual al del material a 1.5m de profundidad.

<sup>b</sup>Con respecto a masa volumétrica seca máxima obtenida mediante prueba AASHTO Estándar con humedad óptima.

Para mayores especificaciones en la calidad del material, consultar el manual N-CMT-1-03/02

- Materiales calidad pavimento  
Son la opción de mejoramiento más costosa, pero presentan propiedades considerablemente mejores a los materiales de terracerías.

## 1. Subbase

Pueden ser materiales naturales, cribados, triturados (parcial o totalmente) o mezclados.

La granulometría del material corresponderá a lo señalado en en manual N-CMT-4-02-001/11 para una subbase con un número de ejes equivalentes acumulados menor a  $10^6$ .

Característica	Valor
Límite líquido (% máximo)	30
Índice plástico (% máximo)	10
Valor de soporte de California CBR (% mínimo)	20
Expansión máxima (%)	2
Grado de compactación (%)	$100 \pm 2$

Para mayores especificaciones en la calidad del material, consultar el manual N-CMT-4-02-001/11

## 2. Base

El material se contendrá como mínimo 50% de partículas producto de la trituración de rocas sanas.

La granulometría del material corresponderá a lo señalado en en manual N-CMT-4-02-002/11 para una base con un número de ejes equivalentes acumulados menor a  $10^6$ .

Característica	Valor
Límite líquido (% máximo)	25
Índice plástico (% máximo)	6
Equivalente de arena (% mínimo)	40
Valor de soporte de California CBR <sup>a</sup> (% mínimo)	80
Desgaste Los Ángeles (% máximo)	35
Partículas alargadas y lajeadas (% máximo)	40
Grado de compactación <sup>b</sup> (%)	100

<sup>a</sup>Con el grado de compactación señalado en esta tabla.

<sup>b</sup>Con respecto a masa volumétrica seca máxima obtenida mediante prueba AASHTO Modificada.

### 4.2.2. Valores orientativos del suelo

Se proporcionan valores aproximados de las propiedades del suelo requeridas en el análisis.

- Módulo de Poisson

Suelo	Módulo de Poisson
Arena	0.20-0.45
Arena limosa	0.20-0.40
Arena y grava	0.15-0.35
Arcilla	0.20-0.50

- Módulo de elasticidad ( $\text{ton/cm}^2$ )

Suelo	Módulo de elasticidad
Arena suelta	0.106 - 0.246
Arena densa media	0.176 - 0.281
Arena densa	0.352 - 0.563
Arena limosa	0.106 - 0.176
Arena y grava	0.703 - 1.758
Arcilla suave ( $q_u$ 0.25 a 0.50 $\text{kg/cm}^2$ )	0.042 - 0.211
Arcilla media ( $q_u$ 0.50 a 2.00 $\text{kg/cm}^2$ )	0.211 - 0.422
Arcilla compacta ( $q_u$ 2.00 a 4.00 $\text{kg/cm}^2$ )	0.422 - 0.985



## Capítulo 5

# Programa de análisis

Para facilitar el proceso de cálculo propuesto en los capítulos anteriores, se desarrolló un script en MATLAB. Se optó por la modulación de las instrucciones para una mayor facilidad de cálculo y revisión. En este apartado se muestra el código principal, a partir del cual se ejecutan las rutinas aisladas del proceso de cálculo.

### 5.0.1. Limitaciones

1. El programa está limitado al cálculo de zapatas aisladas y centradas.
2. El análisis matricial se limita a marcos bidimensionales.
3. Los elementos que conformen la estructura deben ser de un mismo material.
4. El análisis matricial se limita a secciones prismáticas.
5. El programa no considera el peso propio de los elementos que conforman la estructura, debe ser agregado como una carga externa.
6. El programa no determina los asentamientos a largo plazo en la estructura, pero éstos pueden ser estimados por un cálculo manual e introducidos como un desplazamiento prescrito.

### 5.0.2. Uso del programa

Para el uso del programa, deben encontrarse en la carpeta los siguientes archivos de texto:

- EntradaCimentacion
- Nodos
- Barras
- factoresterzaghi

Es de suma importancia no borrar los archivos listados, sin embargo los archivos de texto generados durante la corrida del programa pueden ser borrados entre cada ejercicio.

A continuación se describe el procedimiento para el uso del asistente de cálculo:

- Propiedades del suelo  
Las propiedades del suelo obtenidas para el diseño de la cimentación serán capturadas en el archivo "EntradaCimentacion.txt".

- Propiedades de la estructura

La geometría y propiedades de los materiales de la estructura serán registrados en los archivos "Nodos.txt" "Barras.txt".

A partir de la estructura propuesta se numerarán los nodos de izquierda a derecha, en sentido ascendente a los niveles de la misma. Posteriormente, las barras verticales se numerarán de izquierda a derecha, del nivel inferior a los superiores; para las barras verticales, el sentido del elemento será del nodo inferior al superior y para las horizontales de izquierda a derecha. Para mayor entendimiento del orden de los elementos, se presenta el siguiente marco:

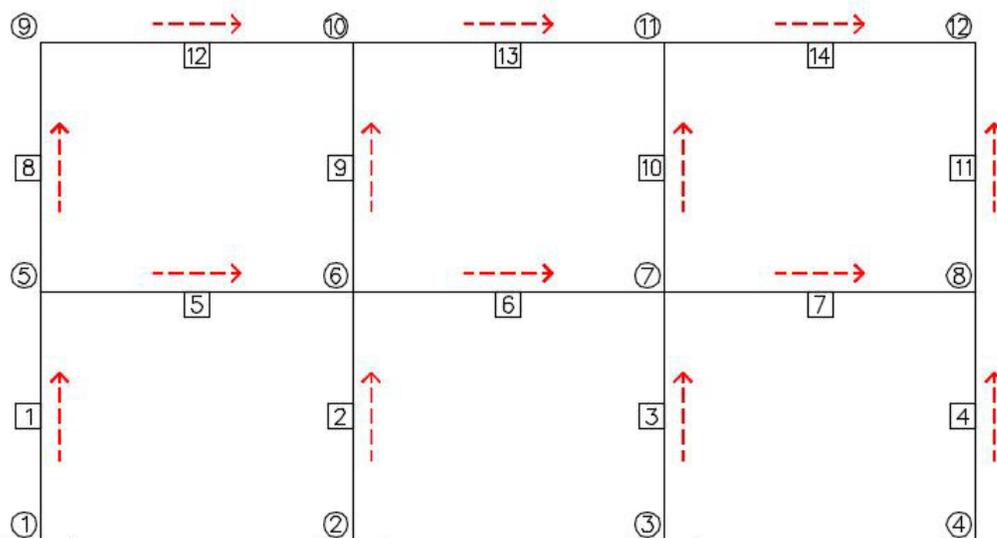


FIGURA 5.1: Numeración de elementos de estructura

- Análisis de la estructura

Se ejecutará el archivo "IESE.m". Al iniciar el proceso se solicitarán las cargas correspondientes a los momentos de empotramiento en las barras, una vez registrada esta información el programa realizará las evaluaciones necesarias y al finalizar la rutina aparecerá en pantalla el mensaje "CALCULO FINALIZADO".

- Resultados

Una vez finalizado el cálculo, serán generados, en la carpeta del programa, dos archivos:

- ReporteIESE.exe, corresponde a los resultados del diseño de cimentación para un marco con soportes empotrados.
- ReporteIESE2.exe, corresponde a los resultados del diseño de cimentación para un marco con soportes de rigidez finita.
- ResultadosMMR, reporte de resultados del análisis matricial para un marco con soportes de rigidez infinita.
- ResultadosMMK, reporte de resultados del análisis matricial para un marco con soportes de rigidez finita.

### 5.0.3. Código principal

Se presentan las instrucciones del archivo IESE.m, que es el código principal para el funcionamiento de la herramienta de cálculo.

```

1      %----- %
2      %   ANALISIS COMO MARCO RIGIDO   %
3      %----- %
4
5      %Calculo de elementos mecanicos iniciales
6      run MEP.m;
7      run Metodomatrical.m;
8      sumar=0;
9      run Cimentacion.m;
10
11     %Calculo de asentamiento elastico y analisis matricial
12         con asentamientos
13     run AsentamientoElastico.m;
14     run Metodomatrical.m;
15
16     %Revision de asentamientos para elementos aislados
17     run RevZA.m;
18     if sum(r1)>0
19         while sum(r1)>0
20             sumar=sumar+5;
21             run RevZA.m;
22         end
23     end
24
25     %Revision de asentamientos para claros de estructura
26     run RevCLA.m;
27     if sum(r2)>0
28         while sum(r2)>0
29             sumar=sumar+5;
30             run Cimentacion.m;
31             run AsentamientoElastico.m;
32             run RevCLA.m;
33         end
34     end
35
36     %Escritura de resultados para marco rigido
37     run ReporteMR.m;
38
39     %----- %
40     %   ANALISIS DE MARCO CON RESORTES   %
41     %----- %

```

```
42     %Nuevo archivo de resultados de analisis matricial
43     copyfile('ResultadosMMK.dat','ResultadosMMR.dat');
44
45     %Rigideces y cimentacion inicial
46     b1=80;
47     e1=15;
48     ki(b1,e1);
49     run Metodomatricial.m;
50     sumar=0;
51     run Cimentacion.m;
52
53     %Rigideces y cargas de diseno
54     ki(bi,esp);
55     run Metodomatricial.m;
56     run Cimentacion.m;
57
58     %Revision de asentamientos para elementos aislados
59     run RevZAKi.m;
60     if sum(r1)>0
61         while sum(r1)>0
62             sumar=sumar+5;
63             run Cimentacion.m;
64             ki(bi,esp);
65             run Metodomatricial.m;
66             run RevZAKi.m;
67         end
68     end
69
70     %Revision de asentamientos para claros de estructura
71     run RevCLAKi.m;
72     if sum(r2)>0
73         while sum(r2)>0
74             sumar=sumar+5;
75             run Cimentacion.m;
76             ki(bi,esp);
77             run Metodomatricial.m;
78             run RevCLAKi.m;
79             run RevZAKi.m;
80         end
81     end
82
83     %Escritura de resultados para marco con resortes
84     run ReporteMRES.m;
85
86     disp("CALCULO FINALIZADO");
```

## Capítulo 6

# Ejemplos

### 6.0.1. Ejemplo 1

- Estructura

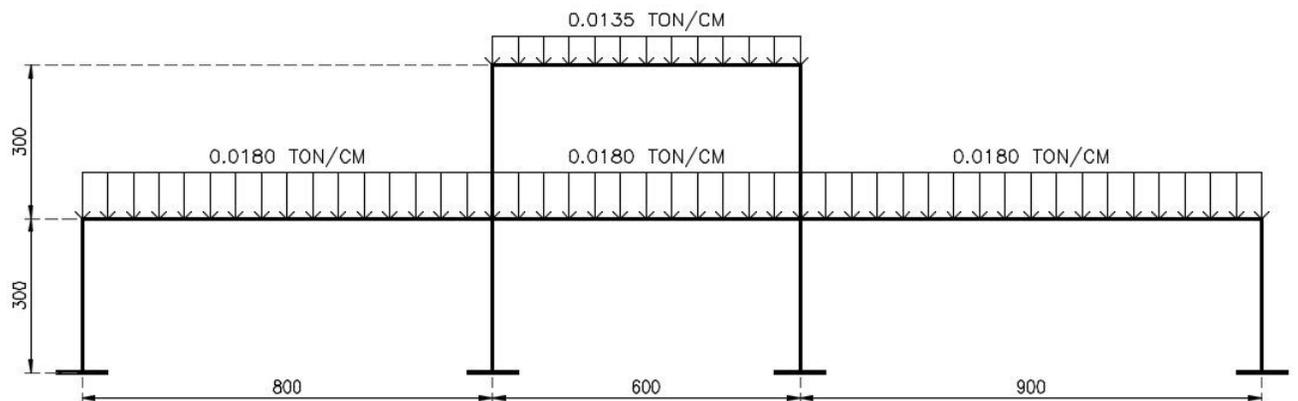


FIGURA 6.1: Marco, ejemplo 1

- Propiedades del suelo

Se considera el caso desfavorable, en que la estructura se encuentra cimentada en una arcilla de consistencia media.

- Cohesión:  $0.0017 \text{ Ton/cm}^2$
- Peso volumétrico del suelo:  $1.7e^{-6} \text{ Ton/cm}^3$
- Profundidad de desplante:  $150 \text{ cm}$
- Ancho del dado:  $60 \text{ cm}$
- Factor de seguridad: 3
- Módulo de Poisson: 0.3
- Módulo de elasticidad:  $0.211 \text{ Ton/cm}^2$
- Módulo de cortante:  $0.081 \text{ Ton/cm}^2$
- Espesor de análisis para el asentamiento:  $300 \text{ cm}$

- Resistencia a la compresión simple del concreto en cimentación:  $250 \text{ kg/cm}^2$
- Propiedades de la estructura
  - Material: Concreto
  - Resistencia a la compresión simple:  $250 \text{ kg/cm}^2$
  - Módulo de Poisson: 0.2
  - Sección en columnas: Cuadrada, 50cm de ancho por 50cm de espesor
  - Sección en traveses: Rectangular, 40cm de ancho por 80cm de espesor
- Geometría

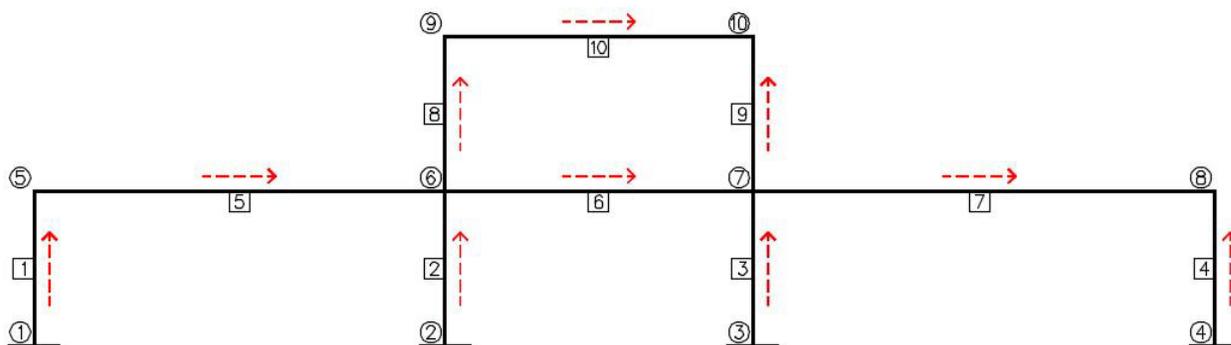


FIGURA 6.2: Geometría, ejemplo 1

## Resultados

Se presentan los resultados obtenidos del diseño de zapatas.

Marco	Ancho (cm)	Espesor (cm)	$Q_{adm}$ (Ton/m <sup>2</sup> )	$Q_{m\acute{a}x}$ (Ton/m <sup>2</sup> )	$Q_{m\acute{i}n}$ (Ton/m <sup>2</sup> )
Empotrado	260	65	42.84	36.1	0
Rigideces finitas	120	15	42.84	23.53	4.16

CUADRO 6.1: Dimensiones y esfuerzos en cimentación, ejemplo 1

Marco	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
Empotrado	1.830	1.250	0.788	1.960
Rigidez finita	0.097	0.234	0.254	0.108

CUADRO 6.2: Asentamientos en cimentación (cm), ejemplo 1

Puede observarse la diferencia entre las dimensiones de los elementos de cimentación. Las mayores dimensiones se encuentran en el marco empotrado, ya que este tiende a aumentar las cargas de diseño, por el efecto de su rigidez, esto también ocasiona que en el diseño de su cimentación sea necesaria una redistribución de esfuerzos.

Los asentamientos finales presentados en los apoyos son coherentes con lo esperado:

- En marco empotrado: Los mayores asentamientos se presentan en las columnas externas, este efecto es producido ya que el asentamiento elástico inicial es mayor en los apoyos interiores y al ser usado en el análisis matricial de la estructura como un desplazamiento prescrito, ocasiona un aumento considerable en las fuerzas de diseño de los apoyos externos, ya que estos deben redistribuir las fuerzas provenientes del claro interior, teniendo como resultado fuerzas menores al centro de la estructura y mayores en los extremos, lo cual implica ante las mismas dimensiones de cimentación, asentamientos menores al centro y mayores en los extremos.
- En marco de rigidez finita: Los asentamientos mayores se encuentran en el centro de la estructura. En este análisis el marco se encuentra apoyado en resortes con una misma rigidez (dado que se supone una misma dimensión de zapata para todos los elementos) así, ante cargas gravitacionales únicamente, las mayores fuerzas se concentran en los nodos centrales, produciendo los mayores asentamientos.

En cuanto a la capacidad de carga, tiene una misma magnitud en ambos casos ya que depende únicamente de la cohesión del material y la profundidad de desplante.

### 6.0.2. Ejemplo 2

En este ejercicio se revisará un marco con mejoramientos calidad terracería.

- Estructura

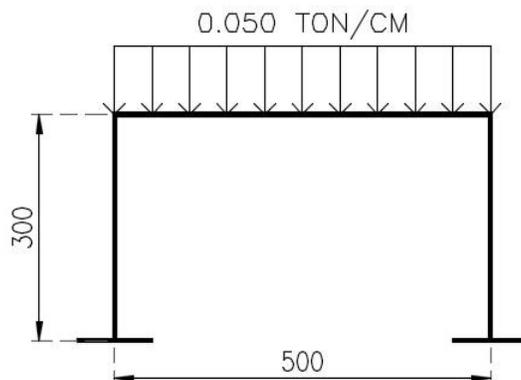


FIGURA 6.3: Marco, ejemplo 2

- Propiedades del suelo

Se considera el caso más desfavorable, en que la estructura se encuentra cimentada en una arcilla de consistencia suave. A continuación se presentan las propiedades del terreno natural:

- Cohesión:  $0.042 \text{ Ton/cm}^2$
- Peso volumétrico del suelo:  $1.7e^{-6} \text{ Ton/cm}^3$
- Profundidad de desplante:  $100 \text{ cm}$
- Ancho del dado:  $50 \text{ cm}$
- Factor de seguridad: 3
- Módulo de Poisson: 0.3
- Módulo de elasticidad:  $0.042 \text{ Ton/cm}^2$
- Módulo de cortante:  $0.016 \text{ Ton/cm}^2$
- Espesor de análisis para el asentamiento:  $500 \text{ cm}$
- Resistencia a la compresión simple del concreto en cimentación:  $250 \text{ kg/cm}^2$

Y las propiedades consideradas en los materiales de mejoramiento

Material	M. Poisson	M. Elasticidad	M. Cortante	Peso vol.	Cohesión	Ángulo
Terraplén	0.3	0.442	0.170	$1750 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-3}$	10
Subrasante	0.25	0.176	0.070	$2080 \times 10^{-6}$	$0.15 \times 10^{-3}$	30
Subbase	0.2	0.352	0.174	$2080 \times 10^{-6}$	$0.10 \times 10^{-3}$	40
Base	0.2	1.5	0.625	$2250 \times 10^{-6}$	$0.05 \times 10^{-3}$	40

CUADRO 6.3: Propiedades mejoramientos, ejercicio 2

- Propiedades de la estructura
  - Material: Concreto
  - Resistencia a la compresión simple:  $250 \text{ kg/cm}^2$
  - Módulo de Poisson: 0.2
  - Sección en columnas: Cuadrada, 40cm de ancho por 40cm de espesor
  - Sección en traves: Rectangular, 30cm de ancho por 50cm de espesor
- Geometría

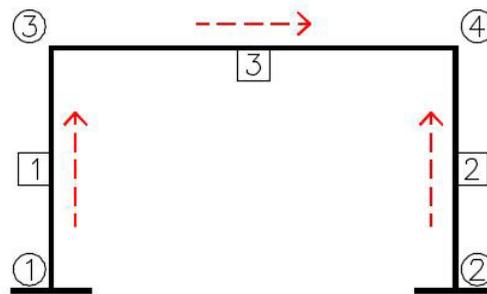


FIGURA 6.4: Geometría, ejemplo 1

### Resultados

Se presentan a manera de tablas y gráficos los resultados obtenidos para el análisis.

Suelo	Ancho (cm)		Espesor (cm)		Qadm (Ton/m <sup>2</sup> )		Qmáx (Ton/m <sup>2</sup> )		Qmín (Ton/m <sup>2</sup> )		Asent. (cm)	
	Emp	Res	Emp	Res	Emp	Res	Emp	Res	Emp	Res	Emp	Res
T. Natural	150	115	20	15	12.92	12.92	12.76	12.12	0	8.67	1.22	0.962
Terraplén	130	100	20	15	19.40	22.55	18.61	16.02	0	11.48	1.36	0.893
Subrasante	165	130	20	15	10.06	10.43	10.03	9.77	0	6.51	1.14	0.791
Subbase	165	125	20	15	10.29	10.86	10.03	10.65	0	6.95	1.14	0.776
Base	165	125	20	15	10.17	10.76	10.03	10.68	0	6.92	1.14	0.762

CUADRO 6.4: Dimensiones, esfuerzos y asentamientos, ejercicio 2

A continuación se comentarán los resultados obtenidos por separado:

- Dimensiones de cimentación

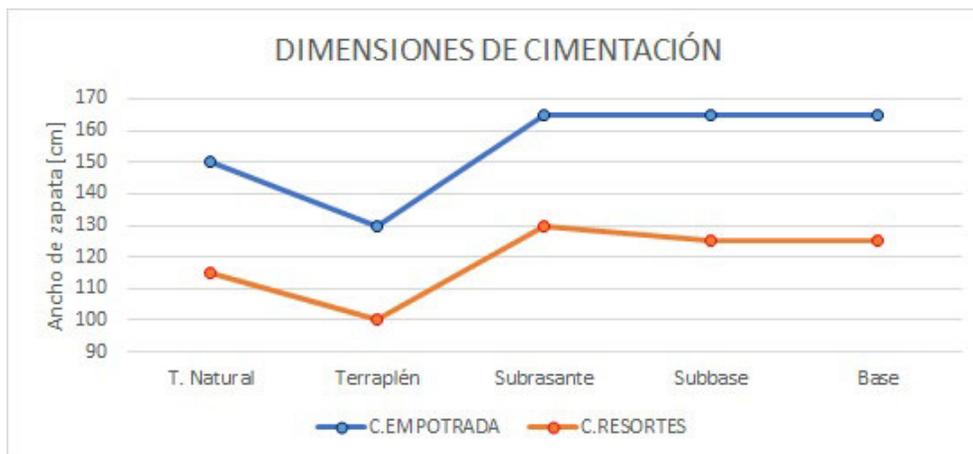


FIGURA 6.5: Dimensiones de cimentación, ejemplo 2

Los anchos para el marco analizado en un medio de apoyo flexible son menores al marco empotrado, esto se debe a la disminución de los elementos mecánicos de diseño, por las rigideces en los apoyos. Con relación al tipo de mejoramiento, la menor dimensión es calculada considerando un material calidad terraplén, esto se debe a que la capacidad de carga es mayor debido a las acciones en conjunto de la parte cohesiva y friccionante del suelo.

- Espesor de cimentación

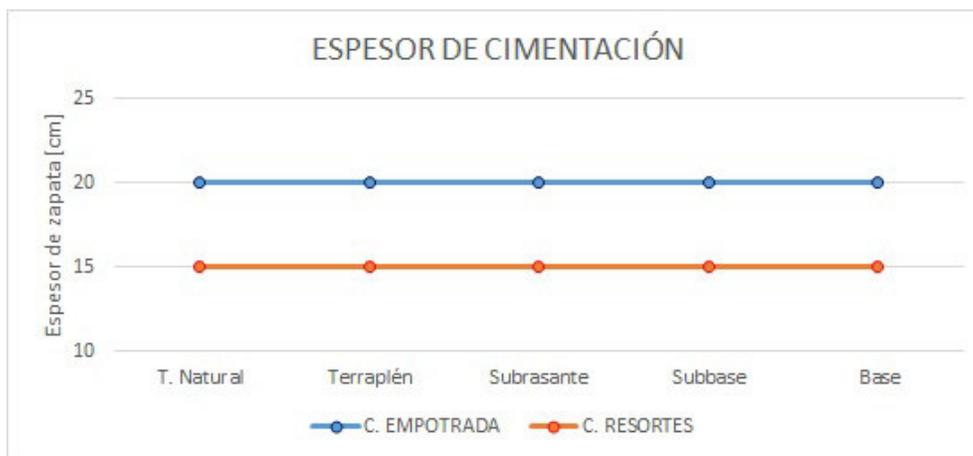


FIGURA 6.6: Espesor de cimentación, ejemplo 2

Los espesores en ambos análisis son constantes. Esto se debe a la magnitud los momentos de diseño, en el marco empotrado son considerablemente mayores en comparación con el marco soportado en resortes y ya que la zapata se fuerza a trabajar como un elemento ancho, su espesor se ve ligado directamente a esta magnitud.

■ Capacidad de carga admisible

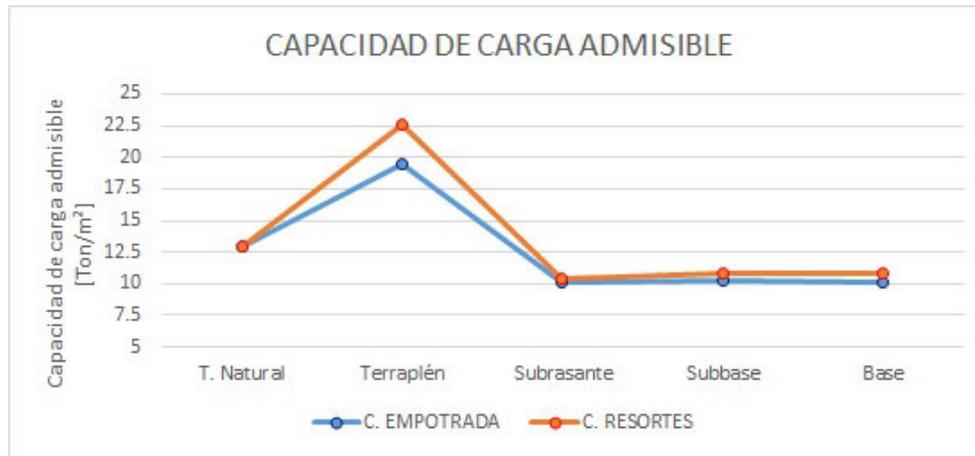


FIGURA 6.7: Capacidad de carga admisible, ejemplo 2

La capacidad de carga aportada por los mejoramientos es similar y poco favorecedora en aquellos cuya composición es mayormente friccionante. El mejor resultado es obtenido usando una mezcla que tiene una mayor aportación de cohesión. Cabe mencionar que el peso aportado por el material también es uno de los factores que disminuyen la capacidad de carga.

■ Esfuerzo máximo en cimentación

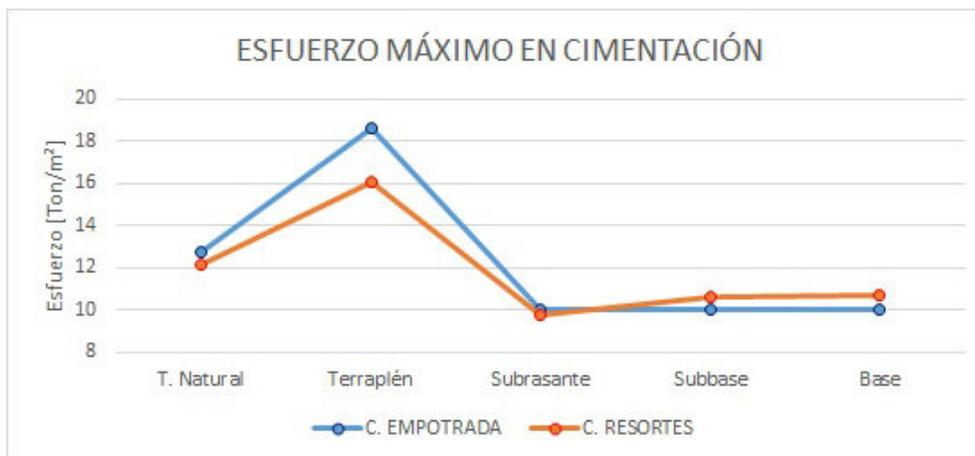


FIGURA 6.8: Esfuerzo máximo en cimentación, ejemplo 2

El mayor esfuerzo se presenta en la zapata de menor ancho, como es esperado. En el caso de las zapatas en el marco empotrado el esfuerzo máximo presentado es más cercano a la capacidad de carga admisible, en comparación con el marco apoyado en resortes.

- Esfuerzo mínimo en cimentación

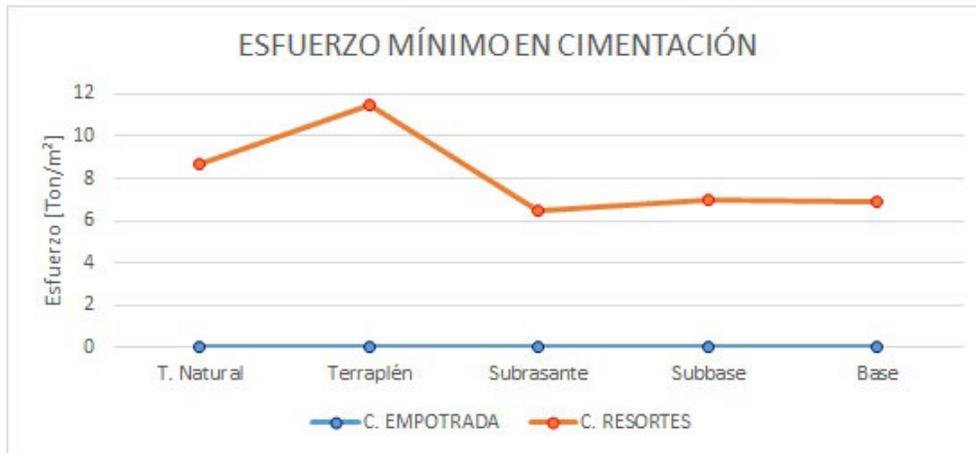


FIGURA 6.9: Esfuerzo mínimo en cimentación, ejemplo 2

En el caso del marco empotrado, el esfuerzo mínimo se mantiene constante y nulo debido a una redistribución de esfuerzos, causada por la excentricidad proveniente del cortante y momento de diseño. En el caso del marco con resortes, el mayor esfuerzo se encuentra en la zapata de menor ancho y tiende a ser constante en las zapatas de dimensión similar, debido a la igualdad de los elementos de diseño.

- Asentamientos

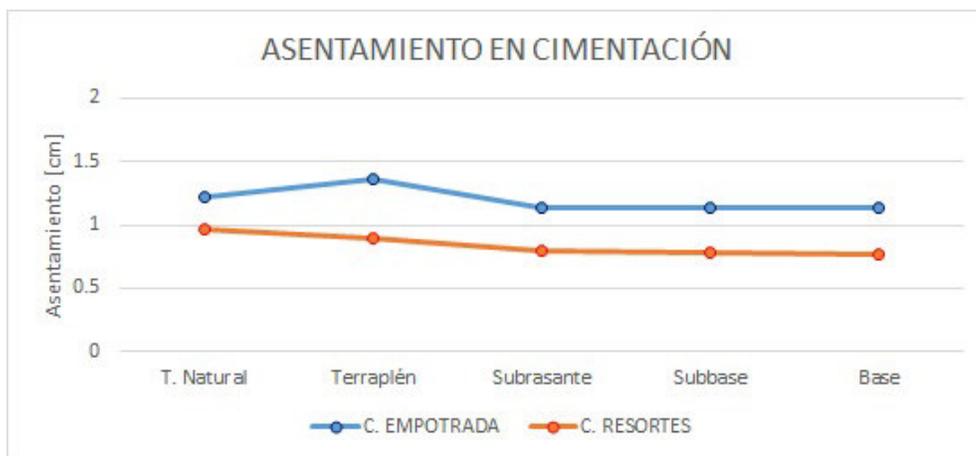


FIGURA 6.10: Asentamientos en cimentación, ejemplo 2

Los mayores asentamientos se presentan en el marco empotrado, dentro de este elemento, la menor magnitud corresponde a los materiales cuya composición es mayormente friccionante. Para el marco apoyado en resortes el mejor compartamiento también se presenta en los materiales friccionantes y tiende a ser similar.

## Capítulo 7

# Conclusiones

Conforme a la información considerada, a los modelos y apoyos de cálculo generados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El uso de una herramienta de cálculo en el diseño de cimentaciones reduce los tiempos de diseño y permite la propuesta de diferentes elementos para la selección de una sección óptima.
- El diseño de toda cimentación requiere de un estudio geotécnico que asegure las propiedades del terreno, así como de todos los materiales involucrados.
- El diseño de cimentaciones mediante modelos totalmente restringidos en los apoyos, proporciona secciones conservadoras y mayores conflictos en la magnitud de los elementos de diseño.
- El uso de apoyos de rigidez finita en el modelado y análisis de estructuras reduce los elementos mecánicos de diseño y por consiguiente las secciones en cimentación.
- Se encontró que para cargas bajas, las dimensiones de los elementos obtenidos, mediante ambos métodos usados, son semejantes.
- En la determinación de los esfuerzos de contacto en la zapata de cimentación, es necesario comentar que el programa está diseñado para llevar a la sección a un estado en el cual cumpla con los requerimientos de la capacidad de carga admisible, pero sin regular el ancho efectivo de contacto. De considerarse este parámetro como una restricción de diseño, las secciones propuestas en los ejercicios aumentarán.
- En relación con los materiales de mejoramiento, puede concluirse que si el conflicto en el suelo de cimentación es la capacidad de carga debe seleccionarse un material cohesivo-friccionante con un mayor porcentaje de material cohesivo, siempre y cuando sea de baja plasticidad; Si el problema de diseño son los asentamientos, la incorporación de un material friccionante proporcionará los mejores resultados.  

Cabe mencionar que las calidades usadas en este trabajo han sido propuestas y no rigen una regla de análisis, pues los materiales usados pueden ser ajustados acorde a lo demandado por el proyecto.
- La selección del método de diseño a utilizar será criterio del proyectista, acorde al resultado deseado y los datos con que se cuente.



# Bibliografía

- Braja, Das (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. CENGAGE Learning.  
CMT. *Calidad de los materiales*. Secretaría de comunicaciones y transporte.
- Colina, Agustín Demeneghi (1996). «Interacción estática suelo-estructura y diseño estructural de cimentaciones». En: *Diplomado en actualización en proyecto y construcción de estructuras*.
- Das, Braja M y Javier Cárdenas León (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning.
- Enrique, Bazán y Meli Roberto (1999). *Diseño sísmico de Edificios*.
- Hibbeler, Russell C (1997). *Structural analysis*. Vol. 1. Pearson Educación.
- Kassimali, Aslam (2012). *Matrix Analysis of Structures SI Version*. Cengage Learning.
- Martínez, Alejandro Hernández (2015). *Aspectos básicos del método de rigideces*. Ed. por Universidad de Guanajuato. Universidad de Guanajuato.
- México, Gobierno de la Ciudad de. *Normas técnicas complementarias de la Ciudad de México*. 2017.<sup>a</sup> ed.
- McGuire, William, Richard H Gallagher y Ronald D Ziemian (2000). *Matrix structural analysis*.
- Piralla, Roberto Meli y Roberto Meli (2001). *Diseño estructural*. Editorial Limusa.
- Russek, Abraham Ellstein. *La interacción suelo-estructura en la práctica*.
- Tellado, Manuel J. Freire (2001). *Interacción del suelo, cimiento y estructura: el caso de las zapatas (1ra parte)*.