

Análisis y Diseño de Cimentaciones Superficiales Cargadas Excéntricamente

Analysis and Design of Eccentrically Loaded Shallow Foundations

Francisco José Luna Rodríguez¹, Julio Cesar Leal Vaca², Ana Mariela Alba Barroso³

¹Profesor de Tiempo Completo del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la División de Ingenierías Campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato, luna.fj@ugto.mx¹

²Profesor de Tiempo Completo del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la División de Ingenierías Campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato, julio.leal@ugto.mx²

³Estudiante del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la División de Ingenierías Campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato, am.albabarroso@ugto.mx³

Resumen

El trabajo describe brevemente las consideraciones para el diseño de una cimentación superficial bajo la acción de cargas excéntricas. Se parte de la revisión de la posición de la carga en función del núcleo central de la zapata. En el caso de estudio, la carga cae fuera de este núcleo central generando una cimentación con excentricidades grandes y presencia de esfuerzos de tensión. En base a estos supuestos se realiza el diseño de la cimentación tomando lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto.

Palabras clave: cimentación, superficial, excentricidades.

Introducción

Una cimentación superficial es una subestructura que permite distribuir la carga de la superestructura al suelo. Las cimentaciones cobran gran importancia, ya que ayudan a transmitir las cargas al suelo y en base a su geometría no exceder las presiones admisibles del mismo.

El principio de diseño de cimentaciones establece que, así como la zapata transfiere carga al suelo, el suelo reacciona generando presión hacia arriba para lograr un equilibrio de fuerzas. La llamada presión de contacto es el esfuerzo que genera la cimentación sobre el suelo que la soporta. Normalmente se asume una distribución de presiones uniforme bajo cimentaciones directas, aunque no siempre es así pues depende de la rigidez de la cimentación y del tipo de terreno, además de la distribución de la carga. En el presente trabajo se desarrolla el caso en que los esfuerzos de contacto no son uniformes.

Para evitar esfuerzos no uniformes, las zapatas deben cargarse concéntricamente, es decir el centroide de la zapata debe coincidir con la posición de las columnas o muros que soporta, sin embargo, en determinados casos, como en zapatas de colindancia o de borde no es posible lograrlo. Otro caso en que las presiones no son uniformes es cuando pese a tener la columna o muro centrados en la zapata, la columna o muro adicional a la carga vertical tienen un momento flexionante grande el cual genera que la resultante de la carga no actúe dentro del núcleo central de la zapata. En tales casos, la distribución de presión en la cimentación sobre el suelo no es uniforme. La distribución de la presión nominal se puede determinar con la fórmula de la escuadría.

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{M_z y}{I_z} + \frac{M_y z}{I_y} \quad \text{Ecuación 1}$$

En la expresión anterior σ es la presión de contacto entre suelo y cimentación, P es la carga vertical en la zapata, M_y y M_z son los momentos que flexionan la zapata, I_y e I_z son las inercias de la zapata respecto a los ejes centroidales y "y" y "z" son las coordenadas en que se desea calcular el esfuerzo respecto a los ejes centroidales.

Núcleo Central en Cimentaciones

El concepto de núcleo central viene de la mecánica de materiales y establece el lugar geométrico en donde puede ser aplicada una carga de compresión de forma que los esfuerzos normales a la superficie donde actúa la carga sean todos de compresión. En este apartado se describe como determinar el núcleo central para una zapata rectangular de base B y largo L.

La posición del núcleo central se determina en función de la ecuación 1. Consiste en calcular las excentricidades “ e_y , e_z ” que puede tener la carga P sin que esta genere esfuerzos de tensión en el elemento. Para encontrar dichas excentricidades se iguala la ecuación 1 a cero:

$$0 = \frac{P}{A} \pm \frac{M_z y}{I_z} \pm \frac{M_y z}{I_y} \quad \text{Ecuación 2}$$

La Ecuación 2 permite saber en qué puntos de la zapata los esfuerzos de contacto son nulos. Los momentos flexionantes se pueden calcular en función de la carga P y de las excentricidades de dicha carga respecto al centroide de la zapata (e_y y e_z). Aplicando esto los momentos se determinan como:

$$M_y = P * e_z \quad \text{Ecuación 3}$$

$$M_z = P * e_y \quad \text{Ecuación 4}$$

Las propiedades geométricas de la cimentación son $A = B * L$, $I_y = \frac{1}{12} B L^3$ e $I_z = \frac{1}{12} B^3 L$, sustituyendo la Ecuación 3 y 4 en la Ecuación 2 tenemos:

$$0 = \frac{P}{BL} + \frac{P e_y y}{\frac{1}{12} B^3 L} + \frac{P e_z z}{\frac{1}{12} B L^3} \quad \text{Ecuación 5}$$

Factorizando y simplificando la Ecuación 5 llegamos a la Ecuación 6, la cual representa la ecuación del eje neutro. El eje neutro es la línea donde los esfuerzos son cero y donde se genera el cambio de tensión a compresión en la sección transversal de la barra.

$$-1 = \frac{12 e_y y}{B^2} + \frac{12 e_z z}{L^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

Con el fin de determinar el núcleo central de la sección se propone que el eje neutro pase por los bordes de la sección de la zapata buscando que no existan esfuerzos de contacto a tensión. En la Figura 1 del lado izquierdo se muestran las líneas de eje neutro que garantizarían cero esfuerzos de tensión en la zapata. Las soluciones son muchas, ya que representan una región y no solo un punto dentro de la estructura. Para simplificar el cálculo del núcleo central, determinamos el punto de intersección entre las soluciones de la ecuación que corresponden a puntos sobre las líneas de eje neutro 1, 2, 3 y 4 (ver Figura 1). Al determinar las excentricidades asociadas a la posición de las líneas 1 a 4 se determinan los puntos extremos de la superficie neutra.

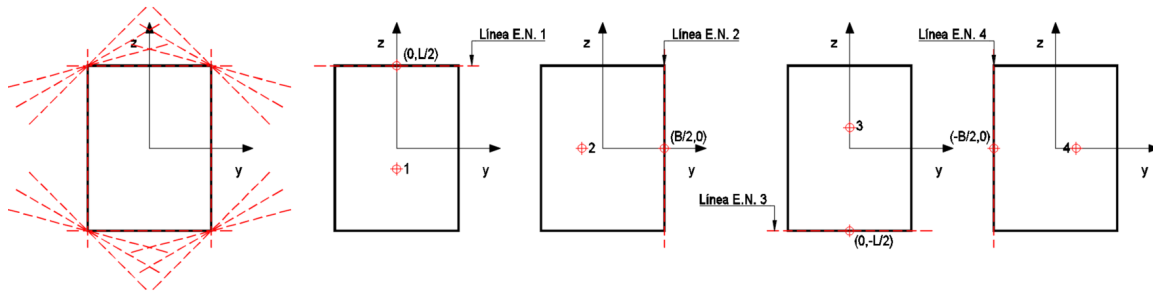


Figura 1.-Posiciones del Eje Neutro

Tabla 1. Puntos para determinar núcleo central

	Coordenadas		Ecuación de Esfuerzos	Excentricidades	
	Y	Z		e_y	e_z
			$-1 = \frac{12e_y y}{B^2} + \frac{12e_z z}{L^2}$		
Punto 1	0	L/2	$-1 = \frac{12e_y(0)}{B^2} + \frac{12e_z(L/2)}{L^2}$	0	$-\frac{L}{6}$
Punto 2	B/2	0	$-1 = \frac{12e_y(B/2)}{B^2} + \frac{12e_z(0)}{L^2}$	$-\frac{B}{6}$	0
Punto 3	0	-L/2	$-1 = \frac{12e_y(0)}{B^2} + \frac{12e_z(-L/2)}{L^2}$	0	$\frac{L}{6}$
Punto 4	-B/2	0	$-1 = \frac{12e_y(-B/2)}{B^2} + \frac{12e_z(0)}{L^2}$	$\frac{B}{6}$	0

Producto del análisis anterior el núcleo central de una zapata de base B y largo L queda definido de la siguiente manera.

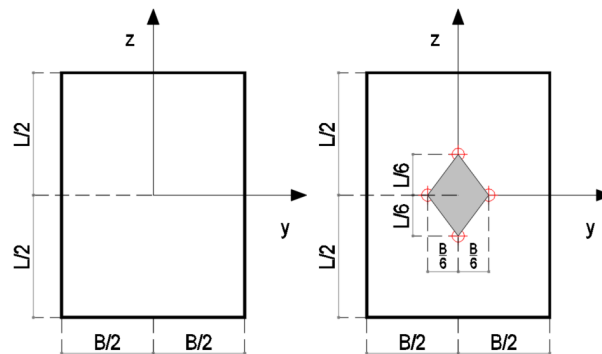


Figura 2.-Núcleo Central sección rectangular

El núcleo central es el rombo sombreado de la Figura 2 y corresponde a la zona donde se puede aplicar la carga de compresión sin que esta genere esfuerzos de tensión. Si la carga cae fuera de esta zona se tendrán esfuerzos de tensión en la cimentación los cuales físicamente no se pueden presentar ya que el suelo no tiene capacidad de trabajo a tensión.

Esfuerzos en Cimentaciones (Excentricidad en un sentido)

En los casos que tenemos excentricidad respecto a un eje los esfuerzos máximos y mínimos en la zapata pueden determinarse con la fórmula de la escuadría de la siguiente forma:

$$q_{\text{máx}} = \frac{Q}{BL} + \frac{6M}{B^2L} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$q_{\text{mín}} = \frac{Q}{BL} - \frac{6M}{B^2L} \quad \text{Ecuación 8}$$

En donde

Q: Carga vertical total

M: Momento sobre la cimentación

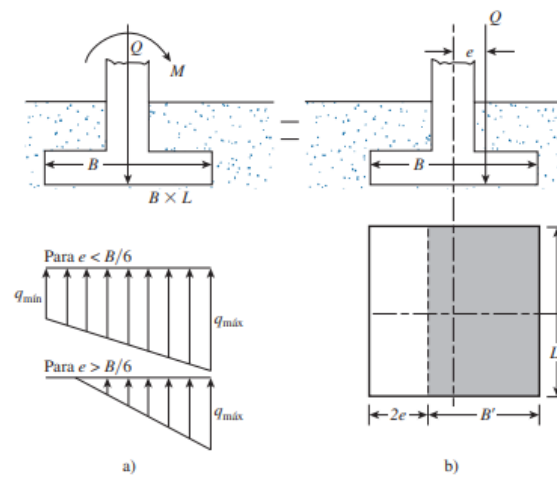


Figura 3.-Cimentaciones cargadas excéntricamente. Tomada de: (Brajá M. Das, 2011)

En la Figura 3a se muestra un sistema de fuerzas equivalente al de la Figura 3b.

$$e = \frac{M}{Q} \quad \text{Ecuación 9}$$

La distancia e, es la excentricidad. Sustituyendo la Ecuación 9 en la Ecuación 7 y Ecuación 8, se obtiene:

$$q_{\text{máx}} = \frac{Q}{BL} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) \quad \text{Ecuación 10}$$

$$q_{\text{mín}} = \frac{Q}{BL} \left(1 - \frac{6e}{B}\right) \quad \text{Ecuación 11}$$

En las ecuaciones anteriores, cuando la excentricidad e toma el valor de B/6, $q_{\text{mín}}$ es cero, Para $e > B/6$, $q_{\text{mín}}$ será negativa, lo que significa que se desarrollará una tensión. Los esfuerzos se incrementan fuertemente para pequeños incrementos de la excentricidad.

En el caso de cimentaciones superficiales que transmiten al terreno una carga vertical Q, y dos momentos M_y y M_z , actuando simultáneamente, el sistema equivalente a carga está conformado por una carga excéntrica de valor Q ubicada en el punto (e_y, e_z) siendo:

$$e_z = \frac{M_y}{Q} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$e_y = \frac{M_z}{Q} \quad \text{Ecuación 13}$$

El lado de la cimentación, ancho (B) o largo (L), se corrige por excentricidad reduciéndolo dos veces la excentricidad, con el fin de ubicar la carga en el centro de gravedad del área efectiva. El centro de gravedad del área efectiva debe coincidir con la posición de la carga excéntrica y debe seguir el contorno más próximo de la base real con la mayor precisión posible. Su forma debe ser rectangular, aun en el caso de cimentaciones circulares.

$$A_e = B' \times L' \quad \text{Ecuación 14}$$

$$B' = B - 2e_x \quad \text{Ecuación 15}$$

$$L' = L - 2e_y \quad \text{Ecuación 16}$$

Debido a que el suelo no puede soportar tensiones, habrá una separación entre la cimentación y el suelo debajo de ella. La naturaleza de la distribución de la presión sobre el suelo será como se muestra en la Figura 3a. Entonces el valor de $q_{\text{máx}}$ es:

$$q_{\text{máx}} = \frac{4Q}{3L(B - 2e)} \quad \text{Ecuación 17}$$

Si la carga es muy excéntrica como en el caso de zapatas de borde pueden producirse giros importantes. Para evitar esta situación se pueden colocar vigas para conectar estas zapatas con otras y de esta manera soportar mejor el momento.

El método para diseñar cimentaciones superficiales se basa en la determinación de la capacidad de carga admisible del suelo, la cual se refiere a la capacidad que tiene un suelo de soportar una estructura y las presiones que esta genere. Cuando la excentricidad toma valores mayores a $B/6$, la modelación numérica arroja valores muy bajos de capacidad de carga, a medida que se incrementa la excentricidad.

Capacidad de Carga Última Ante Carga Excéntrica

El método para determinar la capacidad de carga última utilizado en este artículo es el Método del área efectiva (Meyerhof, 1953).

Capacidad de carga última ante carga excéntrica (excentricidad en un sentido)

En 1953, Meyerhof propuso una teoría a la que generalmente se le refiere como método del área efectiva. El siguiente es un procedimiento paso a paso para determinar la capacidad de carga última que un suelo puede soportar y el factor de seguridad contra la falla.

- **Paso 1.** Se determinan las dimensiones efectivas de la cimentación (Figura 3b):

$$B' = \text{ancho efectivo} = B - 2e \quad L' = \text{longitud efectiva} = L$$

Si la excentricidad fuera en la dirección de la longitud de la cimentación, el valor de L' sería igual a $L - 2e$. El valor de B' sería igual a B . La menor de las dos dimensiones (es decir, L' y B') es el ancho efectivo de la cimentación.

- **Paso 2.** Se utiliza la Ecuación 18 para la capacidad de carga última:

$$q'_u = c' N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad \text{Ecuación 18}$$

Para evaluar F_{cs} , F_{qs} y $F_{\gamma s}$, se utilizan las relaciones dadas en la tabla 3.4 del libro (Braja M. Das, 2011), con las dimensiones de la longitud efectiva y del ancho efectivo en vez de L y B , respectivamente. Para determinar F_{cd} , F_{qd} y $F_{\gamma d}$, se utilizan las relaciones indicadas en la tabla 3.4. Sin embargo, no se reemplaza B por B' .

- **Paso 3.** La carga última total que la cimentación puede soportar es:

$$Q_{\text{útt}} = \frac{A_e}{q'_u(B'xL')} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde

A_e Área efectiva

- **Paso 4.** El factor de seguridad contra la falla de capacidad de carga es:

$$FS = \frac{Q_{\text{útt}}}{Q} \quad \text{Ecuación 20}$$

Capacidad de carga última ante carga excéntrica (excentricidad en dos sentidos)

Una situación en la que una cimentación se somete a una carga vertical última $Q_{\text{útt}}$ y a un momento M , como se muestra en las Figura 4a y b. Para este caso, las componentes del momento M con respecto a los ejes x y y se pueden determinar como M_x y M_y , respectivamente. (Consulte la Figura 4) Esta condición es equivalente a una carga $Q_{\text{útt}}$ colocada excéntricamente sobre la cimentación con $x=e_B$ y $y=e_L$ (Figura 4d).

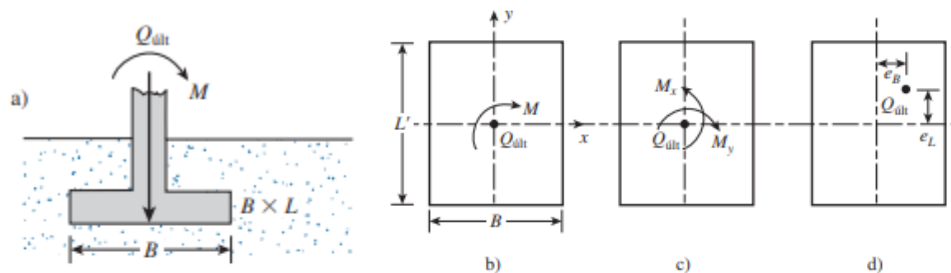


Figura 4.-Análisis de una cimentación con excentricidad en dos sentidos. Tomada de: (Braja M. Das, 2011)

Si se necesita $Q_{\text{útt}}$, se puede despejar de la Ecuación 19, es decir:

$$Q_{\text{útt}} = q'_u A'$$

Obteniendo q'_u con la Ecuación 18, igual que antes, para evaluar F_{cs} , F_{qs} y F_{gs} (tabla 3.4), se utiliza la longitud efectiva L' y el ancho efectivo B' en lugar de L y B , respectivamente. Para calcular F_{cd} , F_{qd} y F_{gd} , no se reemplaza B por B' . El área efectiva se determina mediante la **Ecuación 14**, sin embargo, al determinar el área efectiva A' , el ancho efectivo B' y la longitud efectiva L' , se pueden originar cinco casos (Highter & Anders, 1985).

Caso I. $\frac{e_y}{L} \geq \frac{1}{6}$ y $\frac{e_x}{B} \geq \frac{1}{6}$. El área efectiva para esta condición se muestra en la Figura 5, y se obtiene como se muestra a continuación:

$$A' = \frac{1}{2} B_1 L_1 \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde

$$B_1 = B \left(1.5 - \frac{3e_B}{B} \right) \quad \text{Ecuación 22}$$

$$L_1 = L \left(1.5 - \frac{3e_L}{L} \right) \quad \text{Ecuación 23}$$

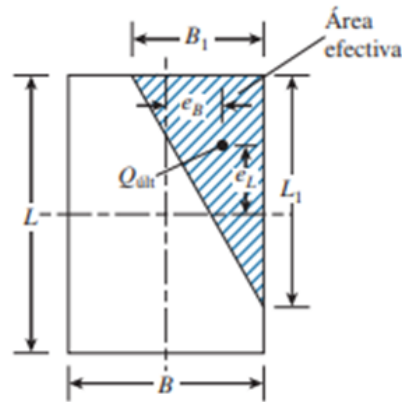


Figura 5.-Área efectiva para el caso I. Tomada de (Braja M. Das, 2011)

La longitud efectiva L' es la mayor de las dos dimensiones B_1 y L_1 . Por lo tanto, el ancho efectivo es:

$$B' = \frac{A'}{L'} \quad \text{Ecuación 24}$$

Caso II. $\frac{e_y}{L} < 0.5$ y $0 < \frac{e_x}{B} < \frac{1}{6}$. El área efectiva para esta condición se muestra en la Figura 6, y se obtiene como se muestra a continuación:

$$A' = \frac{1}{2}(L_1 + L_2)B \quad \text{Ecuación 25}$$

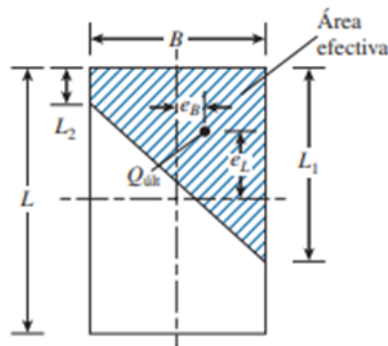


Figura 6.-Área efectiva para el caso II. Tomada de (Braja M. Das, 2011)

Las magnitudes de L_1 y L_2 se pueden determinar de la Figura 7. El ancho efectivo es:

$$B' = \frac{A'}{L_1 \text{ o } L_2 \text{ (el mayor)}} \quad \text{Ecuación 26}$$

La longitud efectiva L' es:

$$L' = L_1 \text{ o } L_2 \text{ (el mayor)} \quad \text{Ecuación 27}$$

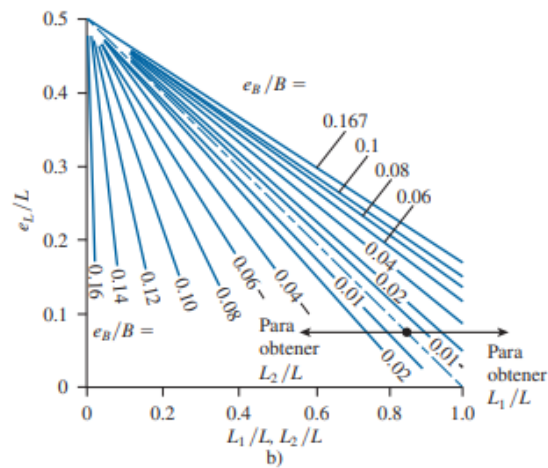


Figura 7.-Magnitudes de longitud para el caso II. Tomada de (Braja M. Das, 2011)

Caso III. $\frac{e_y}{L} < \frac{1}{6}$ y $0 < \frac{e_x}{B} < 0.5$. El área efectiva, se muestra en la Figura 8, obteniéndose de la siguiente manera:

$$A' = \frac{1}{2}(B_1 + B_2)L \quad \text{Ecuación 28}$$

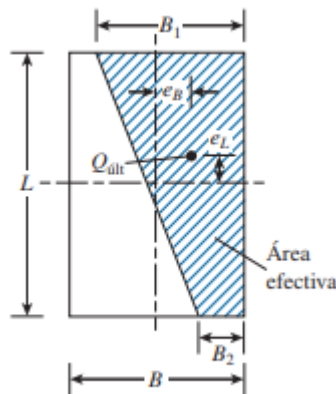


Figura 8.-Área efectiva caso III. Tomada de (Braja M. Das, 2011)

El ancho efectivo es:

$$B' = \frac{A'}{L} \quad \text{Ecuación 29}$$

La longitud efectiva es:

$$L' = L \quad \text{Ecuación 30}$$

Las magnitudes de B_1 y B_2 se pueden determinar de la Figura 9.

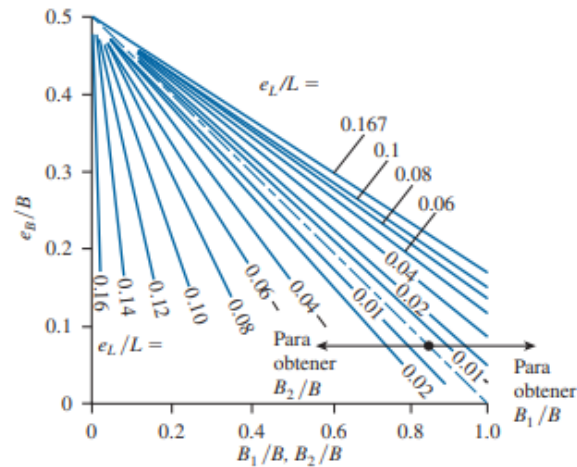


Figura 9.-Magnitudes de ancho para el caso III. Tomada de (Braja M. Das, 2011)

Caso IV. $\frac{e_y}{L} < \frac{1}{6}$ y $\frac{e_x}{B} < \frac{1}{6}$. Para este caso la Figura 10 muestra el área efectiva. La relación B_2/B y por consiguiente B_2 se pueden determinar las curvas e_L/L con pendiente hacia arriba en la Figura 11. De manera similar, la relación L_2/L , y, por tanto, L_2 se pueden determinar empleando las curvas e_L/L con pendiente hacia abajo de la Figura 11. Entonces el área efectiva es:

$$A' = L_2 B + \frac{1}{2}(B + B_2)(L - L_2) \quad \text{Ecuación 31}$$

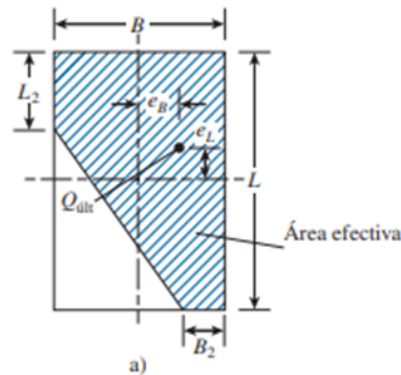


Figura 10.-Área efectiva caso IV. Tomada de (Braja M. Das, 2011)

El ancho efectivo es:

$$B' = \frac{A'}{L} \quad \text{Ecuación 32}$$

La longitud efectiva es:

$$L' = L \quad \text{Ecuación 33}$$

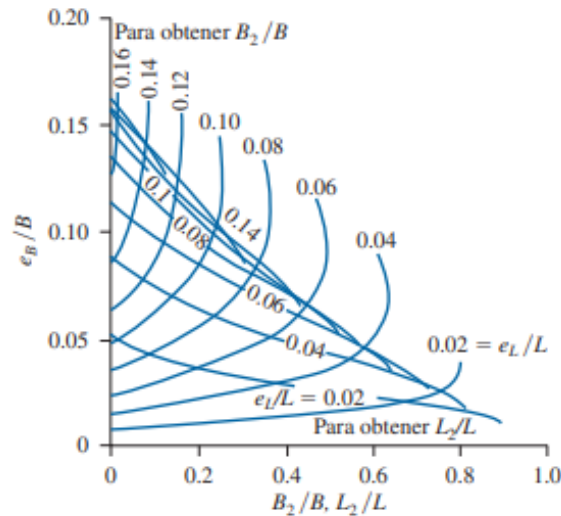


Figura 11.-Magnitudes de ancho y longitud para el caso IV. Tomada de (Braja M. Das, 2011)

Criterios de Diseño de Concreto para Cimentaciones

La cimentación se diseña de forma tradicional en base a las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal en el apartado de diseño de elementos de concreto, para detalles específicos de las consideraciones de diseño de la cimentación se recomienda consultar (Luna Rodríguez, y otros, 2021).

Ejemplos de Diseño de Cimentaciones

Diseño de Cimentación ante Carga Excéntrica (excentricidad en un sentido)

En el ejemplo desarrollado a continuación se tiene una zapata corrida de colindancia en la cual actúa una carga lineal en condición de servicio de 5ton/m y una carga factorizada de 7ton/m. En base a las propiedades mecánicas del suelo se determinó una capacidad de carga admisible $q_{adm}=40\text{ton}/\text{m}^2$. La primera parte del procedimiento es hacer una propuesta de geometría en base a las condiciones del proyecto.

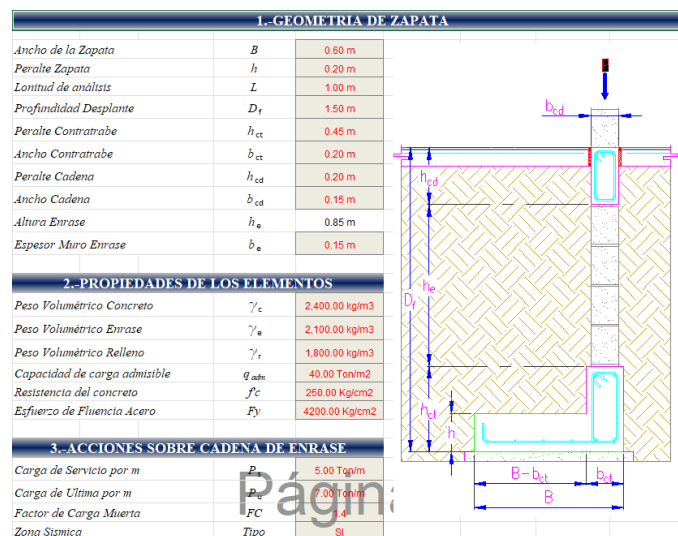


Figura 12.-Ingreso de propiedades para revisión de cimentación

En la Figura 12 en la parte 1, se ingresa la geometría de todos los elementos que componen la cimentación a diseñar. En la sección 2 se ingresan las propiedades de los materiales que conforman la cimentación como son pesos volumétricos, capacidad de carga admisible ya afectada por el factor de seguridad y las resistencias de los materiales para diseño. En la parte 3 se indican las cargas de servicio y últimas que servirán para realizar el diseño de la cimentación, así como el factor de carga considerado para el peso propio de la cimentación.

4.-ARMADO PARA ZAPATA			
		Separación	
Acero Transversal (Principal)	Var#	3	20.00 cm
Acero Longitudinal (Secundario)	Var#	3	15.00 cm
Acero por Temperatura	Var#	3	15.00 cm
Recubrimiento libre	r	4.50 cm	
Recubrimiento calculo	r _{cal}	4.98 cm	

Figura 13.-Ingreso de armados para diseño

En la Figura 13 se muestra el ingreso de varillas consideradas para el diseño de la cimentación, así como los recubrimientos libres y a centro de varilla que son considerados en el diseño.

5.-ACCIONES TOTALES SOBRE EL SUELO							
	Cargas de Servicio				Cargas de Últimas		
Elemento	W (kg)	Xa	Ma	Elemento	Wu (kg)	Xa	Mua
Zapata	288.00 Kg	0.30 m	86.40 Kg.m	Zapata	403.20 Kg	0.30 m	120.96 Kg.m
Contratrabe	120.00 Kg	0.10 m	12.00 Kg.m	Contratrabe	168.00 Kg	0.10 m	16.80 Kg.m
Muro enrase	267.75 Kg	0.10 m	26.78 Kg.m	Muro Enrase	374.85 Kg	0.10 m	37.49 Kg.m
Cadena	72.00 Kg	0.10 m	7.20 Kg.m	Cadena	100.80 Kg	0.10 m	10.08 Kg.m
Relleno	1,053.00 Kg	0.40 m	421.20 Kg.m	Relleno	1,474.20 Kg	0.40 m	589.68 Kg.m
Carga Servicio	5,000.00 Kg	0.10 m	500.00 Kg.m	Carga Ultima	7,000.00 Kg	0.10 m	700.00 Kg.m
Carga Total	6,800.75 Kg		1,053.58 Kg.m		9,521.05 Kg		1,475.01 Kg.m

Calculo de Excentricidad						
Pos. de la Resultante	Xa	0.15 m		Pos. de la Resultante	Xa	0.15 cm
Excentricidad	e _x	0.15 m	> 0.1m	Excentricidad	e _x	0.15 cm
<i>Se generan tensiones se utilizara redistribución</i>				<i>Se generan tensiones se utilizara redistribución</i>		

Figura 14.-Calculo de Elementos Mecánicos para Diseño

En la Figura 14 se muestra el calculo de los elementos mecánicos para el diseño de la cimentación. En la primera columna aparece el elemento considerado. En la segunda el peso de dicho elemento determinado como el producto del peso volumétrico del material y el volumen de este $W = \gamma_m V$. En la columna Xa se coloca el brazo de palanca del peso a partir del extremo derecho de la zapata, este brazo de palanca corresponde a la distancia del centro de gravedad del elemento considerado al extremo derecho de la zapata. En la columna Ma se realiza el producto del peso W por el brazo de palanca Xa, para obtener el momento de la fuerza respecto al extremo derecho de la zapata (Ma).

En la parte inferior de la Figura 14 se indican los resultados de la posición de la resultante y de la excentricidad de dicha resultante respecto al centroide de la zapata. La posición de la resultante se determina en función de la ecuación:

$$X_a = \frac{\sum M_a}{\sum W} = \frac{\text{suma de momentos respecto a}}{\text{suma de cargas verticales}} \quad \text{Ecuación 34}$$

La excentricidad de la resultante se determina en función del centro de la zapata mediante:

$$e = \frac{B}{2} - X_a \quad \text{Ecuación 35}$$

Si la excentricidad resultante en valor absoluto es menor a B/6 (B ancho de la zapata) entonces la carga cae en el núcleo central y no existirán esfuerzos de tensión de lo contrario se deberán redistribuir los esfuerzos como se mostró previamente en el apartado de Esfuerzos en Cimentaciones.

6.-ESFUERZOS ACTUANTES SOBRE EL SUELO				
Área de la zapata	A_c	0.60 m ²		
Inercia de la Base	I_z	0.0180 m ³		
6.1.-ESFUERZOS DE SERVICIO				
Esfuerzo de servicio en el suelo	σ_B	-5.11 Ton/m ²	Esfuerzos de servicio con la formula de la escuadria	
Esfuerzo de servicio en el suelo	σ_A	27.78 Ton/m ²		
<i>Cumple por capacidad de carga</i>				
Debido a que existen esfuerzos de tensión en el suelo se utilizara una distribución de presiones Triangular eliminando las tensiones. Para esto se considera que la resultante de las cargas actua en el tercio de dicho Triangulo. En caso de no existir tensión no se debiera utilizar este procedimiento.				
Ancho Reducido	B'	0.46 m	Ancho Reducido	0.46 m
Esfuerzo de servicio en el suelo	σ_s	29.27 Ton/m ²	Esfuerzo de ultimo en el suelo	40.97 Ton/m ²
<i>Cumple por capacidad de carga</i>				

Figura 15.-Calculo de Esfuerzos en la cimentación

En la Figura 15 se muestra el cálculo del área de la zapata $A = BL$ y su inercia respecto al eje de flexión $I_z = \frac{1}{12} B^3 L$ en ambos casos tomando L como unitaria. Los esfuerzos σ_A y σ_B corresponden al mínimo y máximo y se calculan mediante Ecuación 10 y Ecuación 11. Como era de esperar ya que la excentricidad $e \geq B/6$ existen esfuerzos de tensión en la cimentación. Cuando existen esfuerzos negativos se recomienda realizar una redistribución de esfuerzos, determinando ahora el esfuerzo máximo mediante Ecuación 17, este es el esfuerzo de servicio en el suelo, para obtener el esfuerzo ultimo solo se multiplica el esfuerzo de servicio por el factor de carga. Se verifica que el esfuerzo considerando la redistribución sea menor al esfuerzo admisible del suelo.

7.-CONSTANTES PARA DISEÑO		
Resistencia del concreto	f'_c	250.00 Kg/cm ²
Resistencia a cortante	f^*_c	200.00 Kg/cm ²
Resistencia a flexión	f^*_c	170.00 Kg/cm ²
Factor β_1	β_1	0.85
Porcentaje acero minimo	ρ_{min}	0.0026
Porcentaje acero balanc.	ρ_{bal}	0.0202
Porcentaje acero máximo	ρ_{max}	0.0152
Factor de Reducción por Flexión	F_R	0.9
Factor de Reducción por Cortante	F_R	0.9

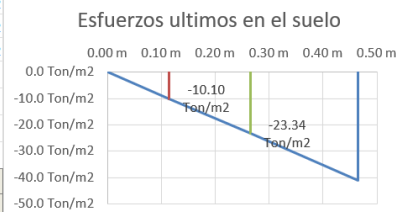


Figura 16.-Constantes de Diseño

En la Figura 16 se muestran las constantes de diseño para poder determinar el armado que se debe considerar en la zapata, estas constantes son la resistencia a compresión del concreto f'_c a los 28 días, los porcentajes de acero mínimo, máximo y balanceado y los factores de reducción de resistencia. En la figura se muestra de lado derecho el esquema de esfuerzos una vez realizada la redistribución, adicional se marcan dos líneas verticales que corresponden a los esfuerzos determinados en el paño de la contratrabe para determinar el momento de diseño y el esfuerzo a una distancia d del paño de la contratrabe para el cálculo de la fuerza de corte en la cimentación.

8.-DISEÑO DE ZAPATA POR FLEXIÓN				
Esfuerzo ultimo en el suelo	σ_u	4.10 Kg/cm ²		
Peralte efectivo	d	15.02 cm		
Longitud en voladizo	L_1	26.48 cm		
Esfuerzo para diseño	σ_f	2.33 Kg/cm ²		
Carga actuante	F_f	3,089.82 Kg		
Momento ultimo	M_u	27,268.86 Kg.cm		
Indice de acero	q	0.00793		
Porcentaje de acero calculo	ρ_{cal}	0.00032		
Porcentaje de acero calculo*1.33	$1.33 * \rho_{cal}$	0.00043		
Porcentaje de acero a colocar	ρ_{prop}	0.00264		
Área de acero necesaria	A_{cal}	3.96 cm ²		
Acero de propuesta Varilla	A_{var}	0.71 cm ²	var#	3
Separación calculada	S_{cal}	18.00 cm		
Separación propuesta	S_{prop}	20.00 cm		
Separación final	Sep	18.00 cm		
<i>Usar Var#3@18cm en lecho inferior</i>				

Figura 17.-Diseño por Flexión en la Zapata

9.-DISEÑO DE ZAPATA POR CORTANTE			
Esfuerzo ultimo en el suelo	σ_u	4.10 Kg/cm ²	
Peralte efectivo	d	15.02 cm	si $\rho < 0.015$
Longitud para Cortante	L_2	11.45 cm	$V_{cr} = F_R b d (0.2 + 20 * \rho) \sqrt{f'_c}$
Esfuerzo para diseño	σ_c	1.01 Kg/cm ²	si $\rho \geq 0.015$
Cortante ultimo	V_u	578.12 Kg	$V_{cr} = 0.5 F_R b d \sqrt{f'_c}$
Porcentaje de acero a colocado	ρ	0.00264	
Cortante critico	V_{cr}	4,832.25 Kg	

Cumple por cortante

Figura 18.-Diseño por Cortante en la Zapata

En la Figura 17 y Figura 18 se muestran los resultados de aplicar las formulas de diseño para determinar la cantidad de acero que debe colocarse a la zapata y si el espesor propuesto de la cimentación es adecuado para soportar la fuerza de corte actuante en la zapata.

Bibliografía/Referencias

- Alva Hurtado, J. E. (s.f.). *Universidad Nacional de Ingeniería*. Obtenido de <https://www.yumpu.com/es/document/read/67341190/diseño-cimentaciones-conceptosteóricosyaplicacionesprácticas/68>
- Bernedo Ramos, D. (2018). Análisis de los efectos de las cargas excéntricas en la cimentación de edificios con sótano. *Tesis de Licenciatura Pontificia Universidad Católica del Perú*.
- Braja M. Das. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning.
- Espinosa Brito, R. (2009). Revisión de consideraciones geotécnicas y estudio del diseño preliminar de zapatas aisladas en base a análisis de cargas gravitacionales del proyecto ejecutivo para el edificio CENTIA en la UDLAP. *Tesis Licenciatura. Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla*.
- Highter, W. H., & Anders, J. C. (1985). Dimensioning Footings Subjected to Eccentric Loads. *Journal of Geotechnical Engineering*.
- Luna Rodríguez, F. J., Leal Vaca, J. C., Barcenás Iraola, B. A., Chávez Espínola, S. A., Mortera Villalobos, A. M., Rangel Hernández, J. L., & Torres Chahín, C. N. (2021). Análisis y Diseño de Cimentaciones Superficiales. *Jóvenes en la ciencia*.
- Rodríguez Obando, A., Salazar Niño, J. D., & Ruge Cardenas, J. C. (2020). Análisis numérico de excentricidad. *10(20)*. Mundo Fesc.