

Análisis y Diseño de Cimentaciones Superficiales

M.I. Francisco José Luna Rodríguez¹, Dr. Julio Cesar Leal Vaca¹, Torres Chahin Claudia Noemí², Rangel Hernández Jorge Luis², Mortera Villalobos Andrea Minerva², Chávez Espínola Sergio Andrés², Bárcenas Iraola Brandon Axel²
¹Profesor del Tiempo Completo Departamento de Ingeniería Civil, División de Ingenierías Campus Guanajuato
²Estudiante del Departamento de Ingeniería Civil, División de Ingenierías Campus Guanajuato.

Resumen

En este trabajo se presenta una guía acompañada de un código que optimiza la cantidad de materiales, haciendo el análisis y diseño de una cimentación superficial aislada de concreto. Una zapata aislada es un elemento estructural que cumple la función de soportar fuerzas verticales, horizontales y momentos y transmitirlos al suelo debajo de una estructura dada. Las zapatas aisladas se utilizan en estructuras formadas por marcos de concreto o acero. El trabajo se enfoca en zapatas aisladas hechas de concreto reforzado desplantadas sobre un material uniforme. Para el análisis de estabilidad externa se evalúan los factores de seguridad de volteo y capacidad de carga. Respecto a su diseño estructural se tomó en cuenta la Norma Técnicas Complementarias del Distrito Federal (Normas Técnicas Complementarias, 2017). El diseño considera zapatas aisladas centrales, de borde y de esquina.

Palabras clave: Diseño; cimentación; superficial; concreto.

Introducción

Las cimentaciones se dividen en cimentaciones superficiales y cimentaciones profundas. Las cimentaciones superficiales son en las que su desplante se realiza entre 0.5m y 4m sobre estratos superficiales con capacidad portante adecuada, se considera además que una cimentación es superficial cuando su menor dimensión es menor o igual a la profundidad de desplante. Las cimentaciones superficiales se dividen en zapatas aisladas, zapatas corridas, zapatas combinadas y losas de cimentación. En el presente trabajo nos enfocamos a las zapatas aisladas.

Las cimentaciones profundas son aquellas que se desplantan a profundidades grandes hasta encontrar roca o estratos resistentes debido que los estratos superficiales de suelo son débiles o incapaces de resistir las acciones de la estructura sin presentar falla o deformaciones excesivas.

Acciones de Diseño

Las acciones para tomar en cuenta en el diseño de la cimentación son cargas verticales, cargas horizontales y momentos flexionantes. Los elementos anteriores deben ser determinados de un análisis previo de la superestructura y pueden deberse a cargas gravitacionales (cargas muertas o vivas) o cargas accidentales (viento o sismo). Estas acciones se aplican a la cimentación para poder proceder a su diseño.

Combinaciones de Servicio y Diseño

Las acciones del apartado anterior no se utilizan directamente para el diseño de la cimentación es necesario combinarlas para revisar la cimentación ante combinaciones de servicio y para revisar la resistencia del concreto en conjunto con el acero ante combinaciones de diseño (combinaciones de carga ultima). Dichas combinaciones se basan a lo marcado en el Reglamento de Construcción de la Ciudad de México (Normas Técnicas Complementarias, 2017). En las siguientes tablas se muestran los factores de carga considerados para dichas combinaciones.

Tabla 1. Combinaciones de Servicio

Nombre	Combinación
Servicio 01	$CM + CV$
Servicio 02	$CM + CV_{inst} + Viento_x$
Servicio 03	$CM + CV_{inst} + Viento_y$
Servicio 04	$CM + CV_{inst} + Sismo_x + 0.3Sismo_y$
Servicio 05	$CM + CV_{inst} + Sismo_x + 0.3Sismo_y$

Tabla 2. Combinaciones de Diseño

Nombre	Combinación (Grupo B)	Combinación (Grupo A)
Diseño 01	$1.3CM + 1.5CV$	$1.5CM + 1.7CV$
Diseño 02	$1.1CM + 1.1CV_{inst} + 1.1Viento_x$	$1.1CM + 1.1CV_{inst} + 1.1Viento_x$
Diseño 03	$1.1CM + 1.1CV_{inst} + 1.1Viento_y$	$1.1CM + 1.1CV_{inst} + 1.1Viento_y$
Diseño 04	$1.1CM + 1.1CV_{inst} + 1.1Sismo_x + 0.3Sismo_y$	$1.1CM + 1.1CV_{inst} + 1.1Sismo_x + 0.3Sismo_y$
Diseño 05	$1.1CM + 1.1CV_{inst} + 1.1Sismo_y + 0.3Sismo_x$	$1.1CM + 1.1CV_{inst} + 1.1Sismo_y + 0.3Sismo_x$

Capacidad de Carga/Dimensiones Iniciales de la Cimentación

Las dimensiones de la cimentación están en función de la capacidad portante del terreno y de la resistencia de los materiales considerados. Para una propuesta inicial de las dimensiones de la cimentación se puede partir de las dimensiones mínimas. Las dimensiones mínimas de una zapata aislada por convención son de 1m x 1m con un peralte mínimo de 20cm, lo anterior para evitar problemas de punzonamiento del suelo o falta de recubrimiento en el armado de la zapata. Las dimensiones anteriores no garantizan que el suelo sea capaz de soportar los esfuerzos generados por la cimentación. Debido a lo anterior primero se propone una dimensión base y en relación con está utilizando la Teoría propuesta por Meyerhof (Braja M. Das, 2011) se calcula la capacidad portante del suelo, resumida en la siguiente ecuación.

$$q_u = c'N_cF_{cs}F_{cd}F_{ci} + qN_qF_{qs}F_{qd}F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma F_{\gamma s}F_{\gamma d}F_{\gamma i} \quad Ec. 1$$

Donde:

- q_u = Capacidad de carga última del suelo
- c' = Cohesión
- q = Esfuerzo efectivo al nivel del fondo de la cimentación
- γ = Peso específico del suelo
- B = Ancho de la cimentación (=diámetro para una cimentación circular)

$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$	Factores de forma
$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$	Factores de profundidad
$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$	Factores de inclinación de la carga
N_c, N_q, N_γ	Factores de capacidad de carga

La capacidad de carga última del suelo se dividió entre un factor de seguridad que depende de las propiedades del suelo y que debe ser recomendado por un experto en la materia para obtener la capacidad de carga admisible $q_{adm} = \frac{q_u}{F.S.}$.

Las nuevas dimensiones de la cimentación se determinan en base a la capacidad de carga obtenida considerando la carga vertical producto de la combinación de servicio que baja a través de la cimentación hacia el suelo. Si la zapata es central las nuevas dimensiones se obtienen dividiendo la carga vertical entre la capacidad de carga, si la zapata es de borde o colindancia se reduce la capacidad de carga en un 50% para obtener las nuevas dimensiones. Lo anterior se realiza como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 3. Propuesta de dimensiones zapatas centrales

$\text{Área de contacto} = \frac{P_s}{q_{ad}}$	<i>Ec. 2</i>
$\text{Dimensiones iniciales de la zapata} = \sqrt{\text{Área de contacto}}$	<i>Ec. 3</i>

Tabla 4. Propuesta de dimensiones zapatas de borde o esquina

$\text{Área de contacto} = \frac{P_s}{0.5q_{ad}}$	<i>Ec. 4</i>
$\text{Dimensiones iniciales de la zapata} = \sqrt{\text{Área de contacto}}$	<i>Ec. 5</i>

Geometría de la cimentación

Además de definir las dimensiones generales de la zapata aislada fue necesario definir la posición del dado dentro de esta. La posición del dado junto con el espesor de la zapata nos servirá más adelante para determinar el caso de punzonamiento a utilizar.

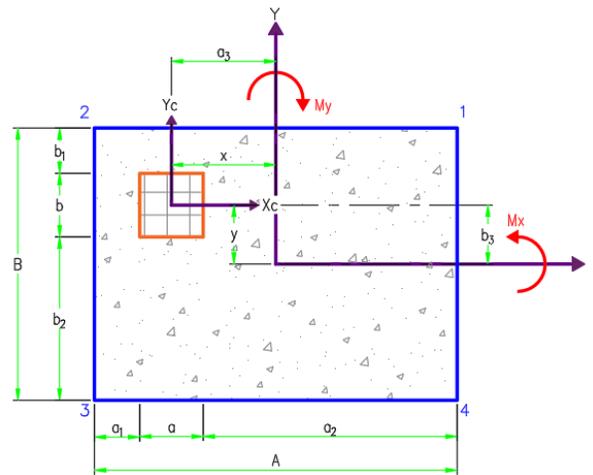


Figura 1 Geometría de la zapata con ubicación de dado

Materiales y Constantes de Diseño

Los materiales y constantes de diseño se tomaron en base a las recomendaciones del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México. En este se establece que el concreto debe ser clase 1 con resistencia mínima a la compresión $f'c \geq 250 \text{ kg/cm}^2$, el acero de refuerzo contar con una resistencia a la fluencia $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, el peso volumétrico del concreto $\gamma_c = 2400 \text{ kg/m}^3$, los pesos volumétricos de los rellenos y del material de desplante quedan en función del estudio de mecánica de suelos (Ver Tabla 5).

Tabla 5. Pesos Volumétricos de Materiales

Símbolo	Características de compacidad	Peso volumétrico seco máx. típico (Proctor estándar ton/m ³)
ML	Buenas a malas.	1.5 a 1.9
	Rodillos neumáticos o pata de cabra.	
CL	Regulares a buenas.	1.5 a 1.9
	Rodillos pata de cabra o neumáticos.	
OL	Regulares a malas.	1.3 a 1.6
	Rodillos pata de cabra o neumáticos.	
MH	Regulares a malas.	1.1 a 1.6
	Rodillos pata de cabra o neumáticos.	
CH	Regulares a malas.	1.3 a 1.7
	Rodillos pata de cabra.	
OH	Regulares a malas.	1.0 a 1.6
	Rodillos pata de cabra.	
Pt	No debe usarse.	

En cuanto a los recubrimientos para el acero se consideró de 5cm siendo la condición mas desfavorable para el diseño del acero de refuerzo.

Revisión por Estabilidad a Volteo

Al diseñar una cimentación además de revisar por capacidad de carga admisible, diseñar la zapata para soportar los elementos mecánicos internos, es necesario revisar la estabilidad de esta ante volteo. Lo anterior no es tan necesario en estructuras compuestas por marcos o donde se tiene más de una zapata, pero se hace de vital importancia en estructuras tipo péndulo invertido que cuentan con solo una zapata y su estabilidad depende de la misma.

En el caso de zapatas de esquina o de borde al revisar las zapatas por volteo y capacidad de carga estas demandan dimensiones grandes para lograr la estabilidad y evitar generar tensiones en la cimentación. Lo anterior se puede solucionar profundizando la cimentación o tomando en cuenta la acción de los empujes pasivos del suelo presente alrededor del dado. Esta opción se deja como la última ya que solo se generará cuando el suelo alcance su punto de falla.

Consultando el libro (Braja M. Das, 2011) se propone el uso de la siguiente ecuación para determinar el valor de las presiones pasivas actuantes en estructuras de cimentación para suelos cohesivos-friccionantes en relación con la Teoría de Rankine:

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma_1 D f^2 + 2c \sqrt{K_p} D f \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$\gamma_1 =$	Peso específico del suelo circundante al dado
$K_p =$	Coefficiente de presión pasiva de tierra de Rankine = $\tan^2(45 + \phi'/2)$
$\phi =$	Ángulo de fricción efectivo del suelo.
$c =$	Cohesión del suelo circundante al dado

Con el fin de determinar el factor de seguridad contra el volteo utilizaremos la siguiente expresión:

$$FS_{(volteo)} = \frac{\sum M_R}{\sum M_o} \geq 1.5 \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$\sum M_o$	Suma de los momentos de las fuerzas que tienden a volcar el muro respecto al punto crítico.
$\sum M_R$	Suma de los momentos de las fuerzas que tienden a resistir el volcamiento del muro respecto al punto crítico.

El momento que tiende a generar el volteo está en función de los momentos actuantes en el dado y los cortantes multiplicados por la profundidad.

$$M_o = M + V * D_f \quad \text{Ec. 8}$$

El momento estabilizante está en función de los momentos generados por el peso de la zapata y las cargas verticales actuando en el muro. Adicional a lo anterior se puede considerar la contribución del empuje pasivo actuando sobre el dado (condición de falla inminente).

Cabe mencionar que la estabilidad de la estructura se realiza ante las combinaciones de servicio, aunque para la elaboración de nuestra herramienta de diseño se añadió la revisión ante cargas de diseño.

Esfuerzos Máximos Generados por la Cimentación

La cimentación se considera como una estructura rígida para poder determinar los esfuerzos producidos en el suelo debajo de ella. Los esfuerzos se determinan en las cuatro esquinas de la zapata mediante la fórmula de la escuadría. Lo anterior en base a las siguientes ecuaciones:

$$q_i = \frac{P_s}{A} + \frac{M_{sx}y}{I_x} + \frac{M_{sy}x}{I_y} \quad \text{Ec. 9}$$

La expresión anterior solo sirve para el caso de esfuerzos en el rango elástico, en esta P, M_x y M_y son los elementos mecánicos actuantes en la cimentación ante combinaciones de servicio. De los esfuerzos calculados en las cuatro esquinas se determina el esfuerzo máximo q_{max} y esfuerzo mínimo q_{min} . Se verifica que se cumpla $q_{max} \leq q_{adm}$ y $q_{min} > 0$ de lo contrario se modifican las dimensiones de la zapata hasta que se cumplan ambas condiciones.

Diseño de la Cimentación por Flexión, Cortante y Punzonamiento-Calculo de Acciones

La cimentación fue diseñada tomando en cuenta la revisión por flexión como viga ancha, la revisión a cortante como viga ancha y el efecto de punzonamiento.

Los esfuerzos calculados en base a las combinaciones de diseño son utilizados para determinar los esfuerzos de diseño. En las siguientes figuras se ilustran dichos esfuerzos para la revisión en sentido x, de igual forma se determinaron los elementos mecánicos en dirección y.

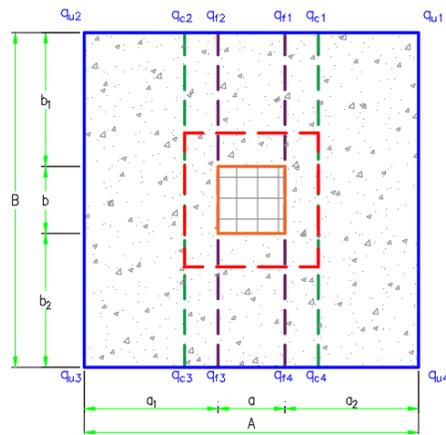


Figura 2 Líneas para Calculo de Esfuerzos en Dirección X.

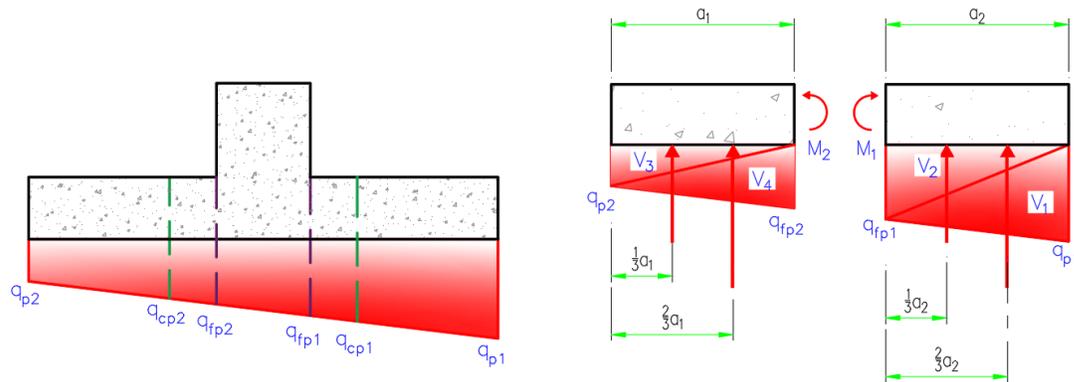


Figura 3 Esfuerzos para diseño en dirección x por flexión.

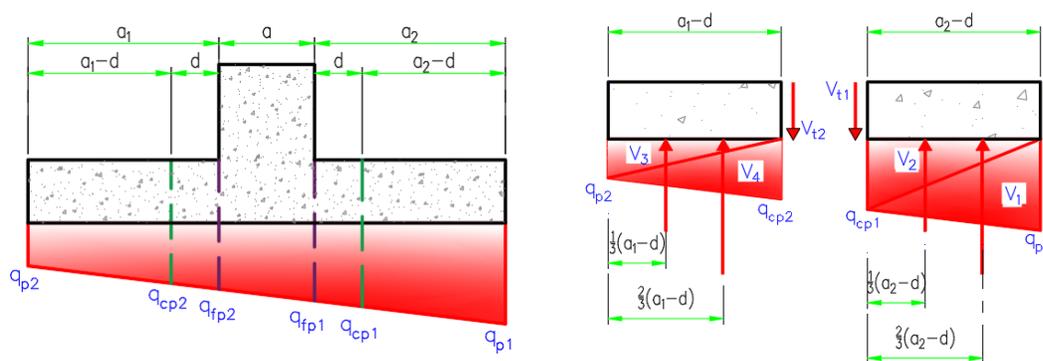


Figura 4 Esfuerzos para diseño en dirección x por cortante.

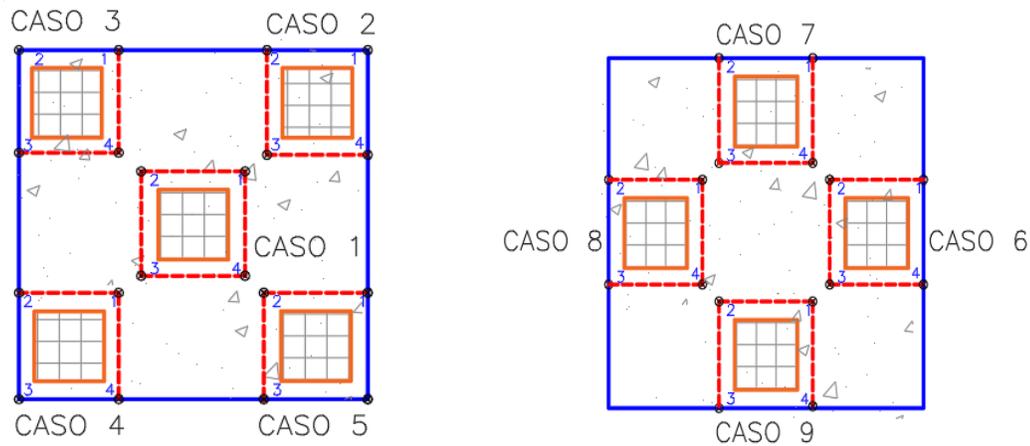


Figura 5 Casos de análisis posibles por punzonamiento.

Para el caso de punzonamiento el autor del libro (McCormac & Brown, 2011) explica que, la carga de compresión de la columna tiende a extenderse en la zapata, oponiéndose a la tensión diagonal en esa zona, con el resultado de que una columna tiende a perforar una porción de losa, que tiene la forma de una pirámide truncada.

Las (Normas Técnicas Complementarias, 2017) establecen que la sección crítica para el cortante en dos sentidos se localiza a una distancia $d/2$ de la cara de la columna, las cuales se representan en las figuras anteriores por medio de líneas punteadas color rojo, para los diferentes casos.

Para conocer la fuerza cortante máxima que actúa en el área de punzonamiento, se determinan las fuerzas en las cuatro esquinas de la sección crítica, mediante la fórmula de la escuadría y de forma general nos quedaría la siguiente ecuación:

$$\tau_u = \frac{V_u}{A_{CR}} + \frac{\alpha_y M_{py} X}{J_{cy}} + \frac{\alpha_x M_{px} Y}{J_{cx}} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde A_{CR} , es el área de la sección crítica, V_u es el cortante de punzonamiento, α_x y α_y son las fracciones de momento que se transmite por punzonamiento, M_{py} y M_{px} son los momentos que actúan sobre la sección crítica, X y Y son las distancias a las cuales se calculan los esfuerzos y J_y y J_x , son los momentos polares de inercia.

Nota: La convención de signos empleada, considera los momentos positivos cuando estos causan compresión en el primer cuadrante del área de punzonamiento.

Para calcular V_u , se consideró que los esfuerzos que se presentan en el área de punzonamiento o sección crítica contrarrestan la fuerza total que baja a través del dado, es decir la carga axial, el peso del dado y el peso del área de punzonamiento, resultando la siguiente ecuación:

$$V_u = P - q_{prom} * A_{CR} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde P es la fuerza total que baja a través del dado y q_{prom} es el promedio de los esfuerzos calculados en las 4 esquinas del área de punzonamiento.

Reglamento de Diseño

El reglamento de diseño utilizado para verificar las dimensiones propuestas de las zapatas es la Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE).

El proceso seguido para revisar la cimentación es el usuario ingresa las dimensiones iniciales de la zapata, las propiedades de los materiales, las propiedades del suelo y las cargas gravitacionales y accidentales. En base a los datos anteriores la hoja genera las combinaciones de carga de servicio y últimas. Con la primera corrida el programa determina la capacidad de carga y verifica que cumpla ante las combinaciones de servicio esto se logra incrementando el tamaño de la cimentación hasta que cumpla. Una vez que se cumple por capacidad de carga se revisa la zapata determinando los elementos mecánicos máximos y en base a estos se modifica el peralte de la zapata para que cumpla en cuanto a cortante, con un armado por flexión pequeño y con un peralte adecuado para que la zapata no sea punzonada por el dado.

Resultados del Análisis y Diseño

El resultado del análisis y diseño son las dimensiones y armados de la zapata de forma que se cumpla ante todas las combinaciones de carga con las disposiciones de diseño y se utilice la menor cantidad de materiales como resultado.

Bibliografía/Referencias

Braja M. Das. (2011). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. Cengage Learning.

McCormac, J., & Brown, R. (2011). Diseño de Concreto Reforzado.

Normas Técnicas Complementarias. (2017). Ciudad de México: Corporación Mexicana de Impresión.

Rico Rodríguez, A., & Castillo Mejía, H. (1992). Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte (IMT). Sanfandila, Qro.