



CAPITULO III

CIMENTACIONES PROFUNDAS

TEMAS:

3.1 INTRODUCCIÓN .- DATOS DE PILOTES

3.2 DISEÑO DE UNA ZAPATA AISLADA SOBRE PILOTES.

3.1.- INTRODUCCIÓN. - DATOS DE PILOTES:

Si la capacidad portante de los estratos superiores del suelo es insuficiente para una cimentación superficial, pero existen estratos más firmes a profundidades mayores, se utilizan pilotes para transferir las cargas a estos estratos más profundos; los pilotes se distribuyen en general en grupos o paquetes, uno bajo cada columna. El grupo se corona con una zapata de distribución, o dado, el cual distribuye la carga de la columna a todos los pilotes del grupo. Estos datos de pilotes son, en muchos aspectos, similares a las zapatas sobre suelo, excepto por dos características: la primera, que las reacciones en el dado actúan como cargas concentradas sobre los pilotes individuales, en vez de hacerlo como presiones distribuidas; la segunda, si el total de todas las reacciones de los pilotes de un grupo se divide por el área de la zapata para obtener una presión uniforme equivalente (sólo con propósitos de comparación), se encuentra que esta presión equivalente es sustancialmente mayor en los datos de los pilotes que en las zapatas superficiales.

Esto significa que los momentos, y en particular los cortantes, también son mayores en forma recíproca, lo cual exige mayores alturas de zapata que para aquéllas superficiales con dimensiones horizontales similares. Con el fin de distribuir la carga a todos los pilotes de manera uniforme, es aconsejable en todo caso suministrar una rigidez considerable, es decir, una buena altura al dado de los pilotes.

Las capacidades admisibles de carga de los pilotes R_a se obtienen a partir de la exploración del suelo, de la energía de hincado de los pilotes y de pruebas de carga, y su determinación no está dentro del alcance de este curso.



Al igual que para zapatas superficiales, la porción efectiva de **R_a** disponible para resistir las cargas no mayoradas de las columnas es igual a la reacción admisible del pilote menos el peso de la zapata, del relleno y la sobrecarga por pilote. Es decir:

$$R_e = R_a - w_f \quad 3.1$$

donde w_f es el peso total de la zapata, relleno y sobrecarga dividido por el número de pilotes.

Una vez determinada la reacción efectiva o disponible por pilote, **R_e** , el número de pilotes en un grupo cargado en forma concéntrica es igual al entero siguiente mayor que:

$$n = \frac{D + L}{R_e}$$

Las consideraciones de diseño con respecto a los efectos del viento, a los momentos producidos por sismo en la base de las columnas y a la seguridad contra el volcamiento son las mismas que se hicieron en la sección para el diseño de zapatas superficiales.

Estos efectos producen por lo general un grupo de pilotes cargado excéntricamente en el cual los distintos pilotes soportan cargas diferentes. La cantidad y ubicación de los pilotes en dicho grupo se determina mediante aproximaciones sucesivas, partiendo de la condición de que la carga en el pilote sometido a mayor carga no debe exceder la reacción admisible del pilote **R_a** . Con una distribución lineal de cargas en los pilotes a causa de la flexión, la máxima reacción de un pilote es:

$$R_{max} = \frac{P}{n} + \frac{M}{I_{pg}/c} \quad 3.2$$

donde **P** es la carga máxima (incluye peso del dado, relleno, etc.) y **M** es el momento que debe resistir el grupo de pilotes, ambos referidos a la parte inferior del dado; **I_{pg}** , es el momento de inercia del grupo completo de pilotes con respecto al eje centroidal alrededor del cual se produce la flexión; y **c** es la distancia desde ese eje hasta el pilote más alejado.

Por ejemplo, $I_{pg} = \sum_1^n (1 * y_n^2)$ es el momento de inercia de **n** pilotes, cada uno considerado como una unidad y localizado a una distancia **y** , del eje centroidal descrito.

Los pilotes se distribuyen por lo regular en patrones ajustados, que minimizan el costo de los dados, pero no pueden colocarse a espaciamientos menores que los permitidos por las condiciones de hincamiento y que los que producirán alteración de la capacidad de carga. Se acostumbra utilizar un espaciamiento aproximado de tres veces el diámetro de la cabeza (parte superior) del pilote, pero no menor que 2 pies 6 pulg. Comúnmente, pilotes con reacciones admisibles entre 30 y 70 toneladas están espaciados a 3 pies 0 pulg.

El diseño de zapatas sobre pilotes es similar al de zapatas para columnas individuales. Un método consiste en diseñar el dado para las reacciones de los pilotes calculadas con las cargas de columna

mayoradas. Para un grupo de pilotes cargado en forma concéntrica esto produciría:

$$R_p = \frac{1,2D + 1,6L}{n}$$

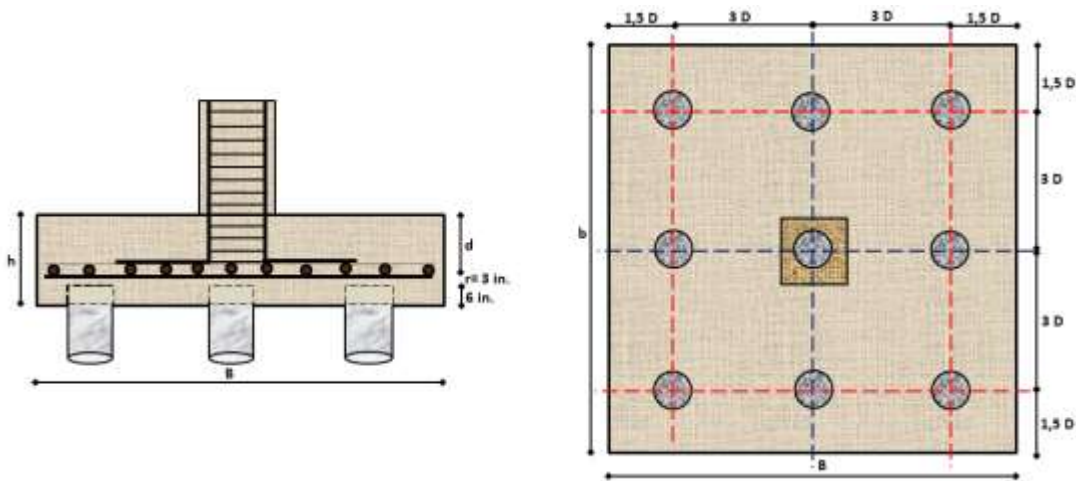


Figura 3.1

Sin embargo, debido a que la cantidad de pilotes se tomó igual al siguiente número entero mayor de acuerdo con la ecuación (3.2), la determinación de R_p , de esta manera puede llevar a un diseño donde la resistencia del dado es menor que la capacidad del grupo de pilotes. En consecuencia, se recomienda tomar una reacción del pilote para el diseño a la resistencia igual a:

$$R_p = R_e * f_p$$

$$f_p = \text{factor de carga ponderado}$$

Donde el factor de carga ponderado = $(1.2D + 1.6L) / (D + L)$. De este modo, el dado se diseña para que sea capaz de desarrollar la capacidad admisible total del grupo de pilotes. Los detalles de un dado común de pilotes se ilustran en la figura 3.1.

Así como en el caso de zapatas superficiales para columnas individuales, la altura del dado de pilotes es controlada por lo regular por cortante. Con respecto a esto debe tenerse en cuenta tanto el cortante por punzonamiento o en dos direcciones, como el cortante por flexión o en una dirección. Las secciones críticas son las mismas que las dadas para el diseño de zapatas aisladas superficiales. La diferencia consiste en que el cortante se produce por las reacciones concentradas de los pilotes en lugar de las presiones distribuidas de contacto.

De aquí surge el interrogante de cómo calcular el cortante si la sección crítica intersecta la circunferencia de uno o más pilotes. Para este caso, el Código ACI 15.5.3 tiene en cuenta el hecho de que la reacción del pilote no es en verdad una carga puntual, sino que se distribuye sobre el área de contacto del pilote. De acuerdo con esto, el Código establece lo siguiente para pilotes con diámetro d_p :

El cálculo del cortante en cualquier sección a través de una zapata sobre pilotes se debe realizar de acuerdo con lo siguiente:

(a) La reacción total de cualquier pilote cuyo centro se localice a una distancia $d_p / 2$ o mayor por fuera de esta sección debe considerarse que produce cortante en esta sección.



(b) La reacción de cualquier pilote cuyo centro se localice a una distancia de $dp/2$ o mayor por dentro de la sección debe considerarse que no produce cortante en esta sección.

(c) Para posiciones intermedias del centro del pilote, la porción de reacción del pilote que se considera que produce cortante en la sección debe basarse en una interpelación lineal entre el valor total a $dp/2$ por fuera de la sección y cero a $dp/2$ dentro de la sección.

Además de verificar el cortante en dos direcciones y en una dirección, como se describió anteriormente, también debe investigarse el cortante por punzonamiento para el pilote individual. Particularmente en el caso de dados sobre una pequeña cantidad de pilotes sometidos a cargas considerables, la altura requerida puede quedar controlada por la posibilidad de punzonamiento del pilote hacia arriba a través del dado.

El perímetro crítico para esta acción se localiza de nuevo a una distancia $d/2$ por fuera del borde superior del pilote. Sin embargo, para dados con alturas relativamente grandes y con pilotes muy cercanos entre sí, los perímetros críticos alrededor de los pilotes adyacentes pueden traslaparse. En este caso, el fracturamiento, si se presenta, ocurrirá indudablemente a lo largo de una superficie inclinada hacia afuera alrededor de los dos pilotes adyacentes. Para estas situaciones, el perímetro crítico se localiza de modo que su longitud sea mínima, como aparece en la figura 3.2 para dos pilotes adyacentes.

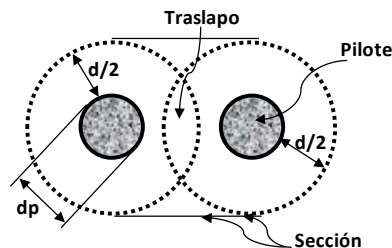


Figura 3.2

3.2 DISEÑO DE UNA ZAPATA AISLADA SOBRE PILOTES:

Diseñar un cimiento sobre pilotes para soportar una columna cuadrada de 18 in x 18 in, sometida a una reacción por carga muerta $D = 143$ Kip, y una reacción por carga viva $L = 165$ Kip, para condiciones de trabajo. Los ensayos de Laboratorio recomiendan una carga última por pilote de 66 Kip, y la carga de trabajo por pilote de 37,4 Kip.

El acero vertical de la columna consiste en 12 barras N° 7. Utilizar un concreto de resistencia a la compresión de $f'_c = 4\,000$ Lb/in²; acero de $f_y = 60\,000$ Lb/in². Y pilotes de diámetro de $dp = 12$ in.



SOLUCIÓN:

Se determina el peso del cimiento por pilote usando el factor de carga ponderado indicado en el ACI, que es igual a:

$$f_p = \frac{1,2 DL + 1,6 LL}{DL + LL} = \frac{(1,2 * 143 + 1,6 * 165) Kip.}{(143 + 165) Kip.} = 1,414$$

Se estima la Reacción efectiva del pilote (R_e), con la siguiente ecuación:

$$R_p = R_e * f_p$$

Donde la reacción del pilote (R_p) es:

$$R_p = 1,2 DL + 1,6 LL / n$$

Donde n = número de Pilotes en este caso asumimos 9.

$$R_p = \frac{1,2 * 143 + 1,6 * 165}{9} = \frac{435,6}{9} = 48,4 Kip.$$

Despejando la Reacción efectiva del pilote se tiene:

$$R_e = R_p / f_p$$
$$R_e = \frac{48,4}{1,414} = 34,23 Kip.$$

Se verifica el número de pilotes:

$$n = \frac{DL + LL}{R_e} = \frac{(143 + 165) Kip.}{34,23 Kip.} = \frac{308 Kip.}{34,23 Kip.} = 8,9 \approx 9 Pilotes$$

También se puede determinar el peso aproximado del cimiento usando el factor de carga del (1 % al 1,25 %) de la carga de la columna, y probando con el 1%, la Reacción efectiva de trabajo por pilote es:

$$w_f = 1 \% * (143 Kip + 165 Kip) = 3,08 Kip./ pilote$$
$$R_e = R_a - w_f = 37,4 - 3,08 = 34,32 kip.$$

Se determina el número de pilotes con:

$$n = \frac{D + L}{R_e} = \frac{143 + 165}{34,32} = \frac{308}{34,32} = 8,97 \approx 9,0 Pilotes$$



Como los pilotes a utilizar son de 12 in. La separación de los centroides, entonces será tres veces el diámetro de los pilotes, que es lo recomendado por el ACI.

$$s_p = 3 * d_p = 3 * 12 = 36 \text{ in.}$$

Y la separación de los pilotes a los bordes del cimiento es:

$$s_p = 1,5 * d_p = 1,5 * 12 = 18 \text{ in.}$$

La distribución de los pilotes es como se muestra en la figura 3.3:

Se determina la carga efectiva última del pilote para diseñar el cimiento:

$$W_U = 1,2 DL + 1,6 LL = 1,2(143) + 1,6(165) = 435,6 \text{ Kip.}$$

Y la carga última por pilote es:

$$R_U = \frac{W_U}{n} = \frac{435,6}{9} = 48,4 \text{ Kip.} \leq P_U$$

Valor que es inferior a la carga última que resiste el pilote, de 66 Kip.

El esfuerzo secante por punzonamiento alrededor de la cara de un pilote individualmente por lo general, es un factor determinante para determinar el espesor del cimiento, excepto en los casos de que las cargas sean pequeñas.

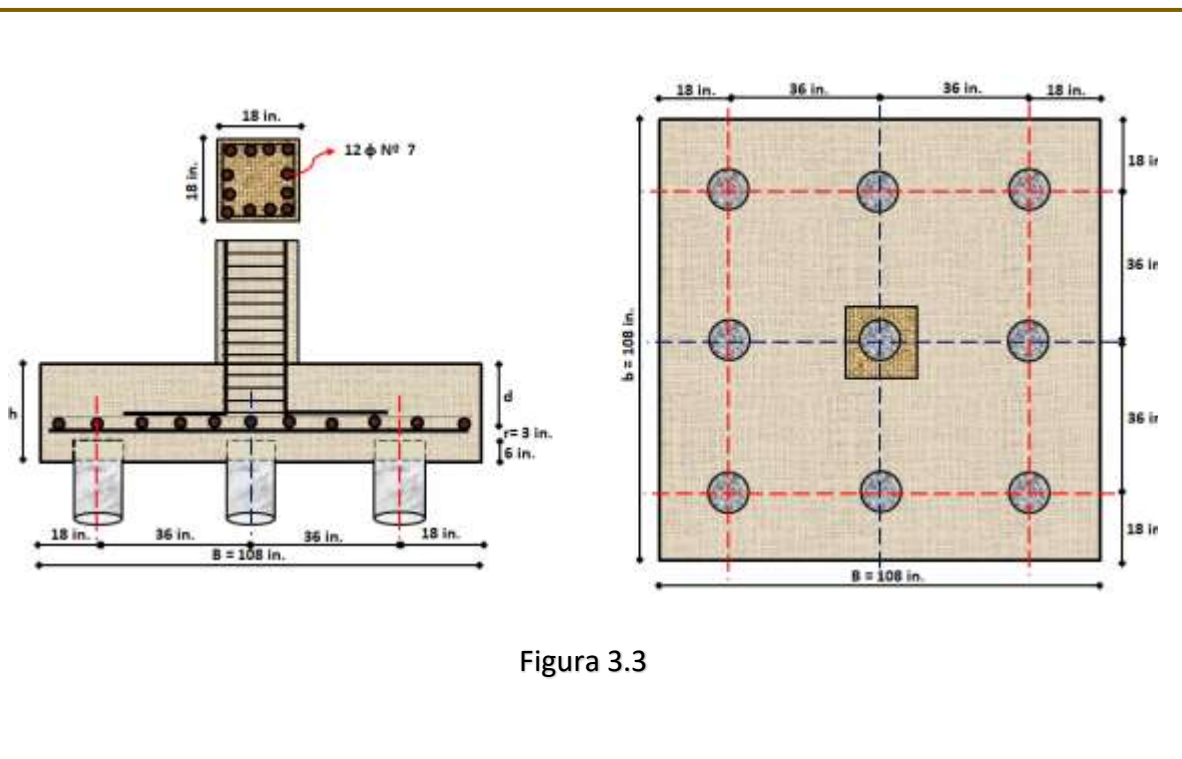


Figura 3.3



Se asume el espesor del cimiento, para esto calculamos la Longitud de desarrollo a la compresión del acero de la columna (L_{dc}).

$$L_{dc} = 0,02 * d_b * \psi_r * \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} \geq 0,0003 * d_b * \psi_r * f_y$$

$$L_{dc} = 0,02 * 0,875 \text{ in.} * 1,0 * 60\,000 \frac{Lb}{\text{in}^2} / \sqrt{4\,000} \frac{Lb}{\text{in}^2} = 16,60 \approx 17,0 \text{ in.}$$

$$L_{dc} = 0,0003 * 0,875 * 1,0 * 60\,000 = 15,75 \approx 16 \text{ in.}$$

$$L_{dc} = 17,0 \text{ in.} \geq 16,0 \text{ in.} \quad \text{Ok.}$$

$$h = L_{dc} + 2\phi + r + 6,0 \text{ in.} = 17 + 2(1) + 3 + 6 = 28 \text{ in.}$$

Donde el peralte asumido d es igual:

$$d = h - r - \frac{0,5\phi + 1,5\phi}{2} - 6,0 \text{ in.} = 28 - 3 - 1 - 6 = 18 \text{ in.}$$

Para la verificación del peso del cimiento por pilote, se determina calculando el peso del dado y dividiendo para el número de pilotes.

$$Vol = 9,0 f_t * 9,0 f_t * 2,33 f_t = 188,73 f_t^3$$

$$P_{\text{cimiento}} = 188,73 f_t^3 * 0,150 \text{ Kip.}/f_t^3 = 28,31 \text{ kip.}$$

$$\frac{P_{\text{cimiento}}}{\text{pilote}} = \frac{28,31 \text{ kip.}}{9 \text{ pilotes}} = 3,15 \text{ kip./pilote}$$

Como el peso del dado por cada pilote, calculado es mayor que el peso asumido, que fue del 1% de la carga de servicio a que está sometida la columna esto es: 3,08 kip./pilote, entonces **No Pasa**. Hay que asumir un porcentaje mayor que 1 %.

Asumimos el nuevo; (w_f).

$$w_f = 1,1 \% * (DL + LL) = 1,2 * (143 + 165) \text{ Kip.}/100 = 3,4 \text{ Kip.}$$

Y se verifica de nuevo el número de pilotes.

$$R_e = R_a - w_f = 37,4 - 3,40 = 34,0 \text{ Kip.}$$

$$n = \frac{P_{\text{servicio}}}{R_e} = \frac{(143 + 165) \text{ Kip.}}{34,0 \text{ Kip.}} = \frac{308 \text{ Kip.}}{34,0 \text{ Kip.}} = 9,06 \approx 9 \text{ pilotes.}$$

Como se mantiene el mismo número de pilotes, no se altera el cálculo realizado se puede continuar con proceso de verificación de los esfuerzos cortantes y de flexión.

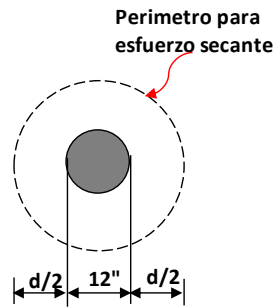


Figura 3.4

CHEQUEO DEL ESFUERZO SECANTE O PUNZONAMIENTO DE PILOTE.

Calculamos el esfuerzo secante por punzonamiento de uno de los pilotes, a la distancia $d_p / 2$, tomando como referencia la figura 3.4.

Se asume un peralte $d = 18$ in.

El perímetro para esfuerzo secante por punzonamiento del pilote es:

$$b_0 = \pi * (d_p + d) = \pi * (12 + 18) \text{ in.} = 94,25 \text{ in.}$$

La carga última de cada pilote es 48,4 Kip o 48 400 Lb, lo que viene a ser el cortante último del pilote:

$$V_U = 48\,400 \text{ lb.}$$

El cortante admisible del concreto es:

$$\phi V_c = 4\phi \sqrt{f'_c} * b_o * d = 4 * 0,75 * \sqrt{4\,000} * 94,25 * d = 17\,882,68 * d \text{ Lb/in.}$$

$$\phi V_c = V_U$$

$$17\,882,68 * d \text{ Lb/in.} = 48\,400 \text{ Lb.}$$

$$d = \frac{48\,400 \text{ Lb.}}{17\,882,68 \text{ Lb/in.}} = 2,71 \approx 3,0 \text{ in.} \leq 18 \text{ in.} \quad \text{OK.}$$

CHEQUEO DEL ESFUERZO CORTANTE EN UNA DIRECCIÓN.

Como, se puede observar en la figura 3.5, hay tres pilotes dentro del área crítica entonces la fuerza cortante es:

$$V_U = 3 * P_U = 3 * 48\,400 = 145\,200 \text{ Lb.}$$

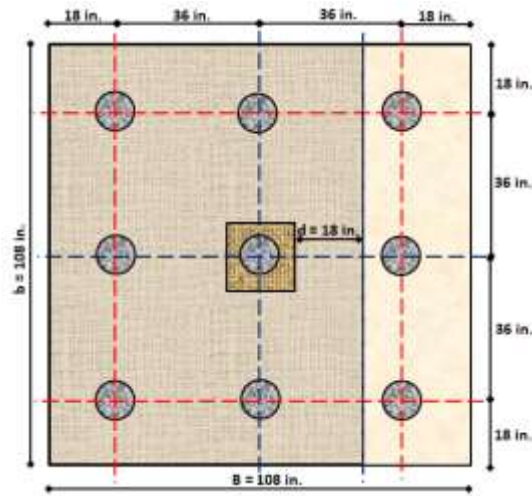


Figura 3.5

Se comprueba el esfuerzo cortante en una dirección y nos basamos en la figura 3.5

El esfuerzo cortante permisible de concreto en una dirección o como viga es:

$$\phi V_c = 2 \phi \sqrt{f'_c} * b * d = 2 * 0.75 * \sqrt{4000} * 108 * d = 10245.78 * d \text{ Lb/in.}$$

$$\phi V_c = V_u$$

$$10245.78 \text{ Lb/in.} * d = 145200 \text{ Lb.}$$

$$d = \frac{145200 \text{ Lb.}}{10245.78 \text{ Lb/in.}} = 14.2 \approx 14.5 \text{ in.} \leq d = 18 \text{ in.} \quad \text{OK.}$$

CHEQUEO DEL ESFUERZO CORTANTE POR PUNZONAMIENTO.

Observando la figura 3.6, en la que se puede notar que dentro del área crítica se encuentran ocho pilotes, que provocan la fuerza cortante en el perímetro de esta área.

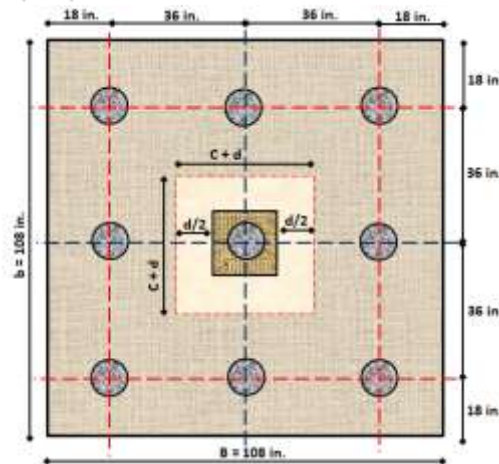


Figura 3.6



$$V_U = 8 * P_U = 8 * 48\,400 \text{ Lb.} = 387\,200 \text{ Lb.}$$

$$b_0 = 4(c + d) = 4 * (18 + 18) = 144 \text{ in.}$$

El esfuerzo cortante permisible del código del ACI es:

$$\phi V_c = 4\phi \sqrt{f'_c} * b_0 * d = 4 * 0,75 * \sqrt{4\,000} * 144 * d = 27\,322,08 * d \text{ lb/in.}$$

$$\phi V_c = V_U$$

$$24976,15 * d \text{ Lb./in.} = 387\,200 \text{ Lb.}$$

$$d = \frac{387\,200 \text{ Lb.}}{27\,322,08 \text{ Lb./in.}} = 14,2 \approx 14,5 \text{ in.} \leq d = 18 \text{ in.}$$

CÁLCULO DEL ESFUERZO A LA FLEXIÓN.

Para los esfuerzos de flexión se analiza el área crítica, para ver cuantos pilotes se encuentran dentro de esta área, y esta se produce a partir de la cara de la columna.

Observando la figura 3.7 se puede ver que hay tres pilotes dentro del área crítica para el momento. Entonces el momento último será:

$$M_U = 3 * P_U * \text{brazo de palanca}$$

$$M_U = 3 * 48\,400 \text{ Lb} * 27 \text{ in.} = 3\,920\,400 \text{ Lb} * \text{in.}$$

$$R_U = \frac{M_U}{\phi * b * d^2} = \frac{3\,920\,400 \text{ Lb} * \text{in.}}{0,90 * 108 \text{ in.} * 18^2 \text{ in}^2} = 124,49 \approx 125 \text{ lb/in.}^2 \leq R_{U(\text{min})}$$

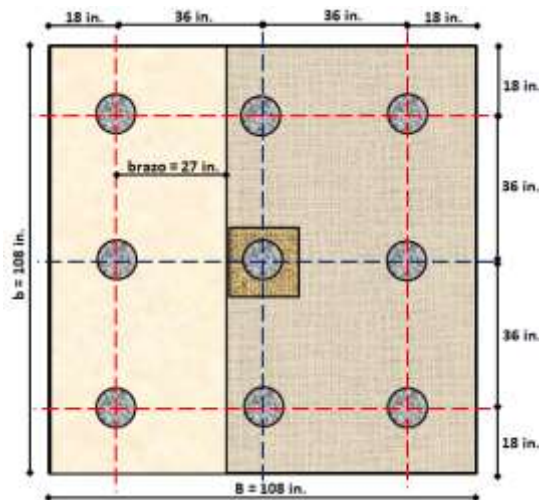


Figura 3.7

Como el R_u calculado es menor que el R_u mínimo, la sección de acero necesario se calcula con cuantía mínima.

$$A_s = \rho_{\text{min}} * b * d$$

$$A_s = 0,0033 * 108 \text{ in.} * 18 \text{ in.} = 6,42 \text{ in.}^2$$

$$\#barras = \frac{A_s}{A_b} = \frac{6,42 \text{ in.}^2}{0,60 \text{ in.}^2} = 10,7 \approx 11 \phi \text{ N}^\circ 7 @ 10,2 \text{ in.}$$

Se disponen 11 barras N° 7 en ambas direcciones separadas cada 10,2 in.

DETALLE DEL REFUERZO VISTA EN CORTE:

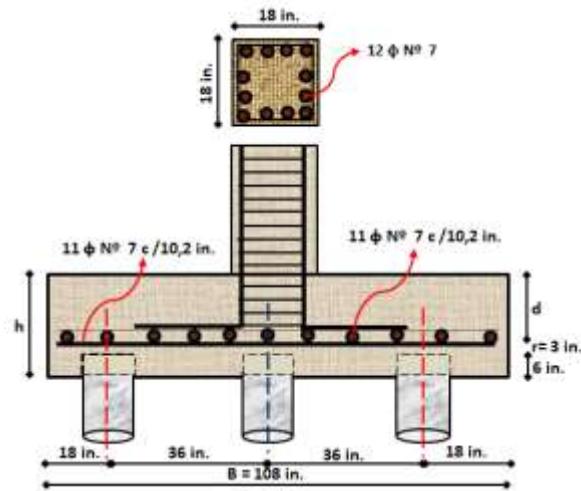


Figura 3.8

DETALLE DEL REFUERZO VISTA EN PLANTA:

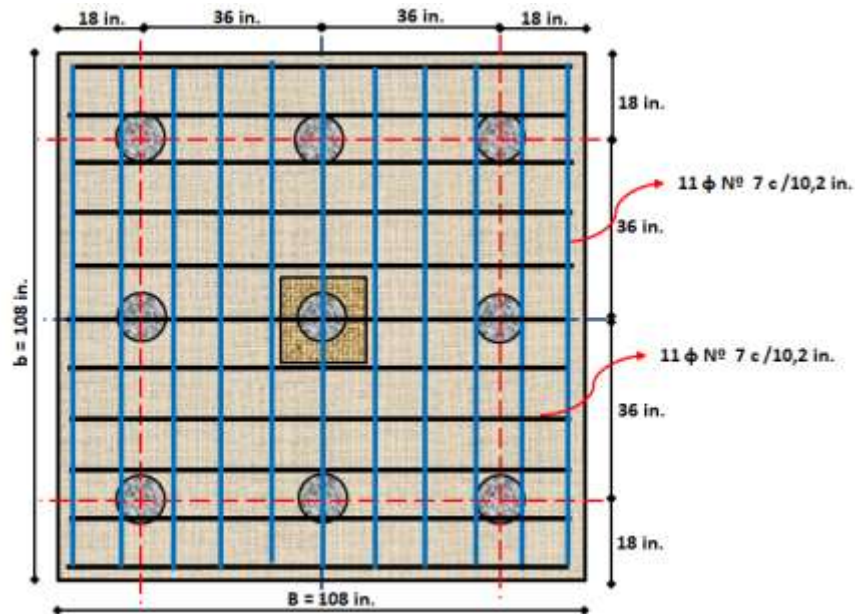


Figura 3.9



CALCULO DE LA LONGITUD DE DESARROLLO REQUERIDA:

L_d = ACERO DE REFUERZO LONGITUDINAL.- ϕ # 7

$$L_d = \frac{3}{40} * \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} * \frac{\psi_t * \psi_e * \psi_s * \psi_g}{\frac{C_b + k_{tr}}{d_d}} * d_b$$

$$\frac{C_b + k_{tr}}{d_b} = \frac{3 + 0}{0,875} = 3,43 > 2,5$$

Se escoge el valor de 2,5.

$$L_d = \frac{3}{40} * \frac{60\,000}{1,0 \sqrt{4\,000}} * \frac{1,0 * 1,0 * 1,0 * 1,0}{2,5} * 0,875 = 24,90 \approx 25 \text{ in.}$$

$$L_{d-dispo.} = \frac{B - C}{2} - r = \frac{(108 - 18) \text{ in.}}{2} - 3,0 \text{ in.} = 42 \text{ in.}$$

$$L_{d-dispo} = 42 \text{ in.} > L_{d-req} = 25 \text{ in.} \Rightarrow OK:$$

VERIFICACIÓN DE ESFUERZO DE TRANSFERENCIA:

FUERZA PERMISIBLE EN EL APOYO DEL CONCRETO EN LA BASE DE LA COLUMNA.

$$f_p = \phi * (0,85 * f'_c * A_g) \quad \phi = 0,65 \Rightarrow \text{Por aplastamiento}$$

$$P_U = 1,2(DL) + 1,6(LL) = 1,2(143 \text{ Kip.}) + 1,6(165 \text{ Kip.}) = 435,6 \text{ Kip.}$$

$$f_p = 0,65 * (0,85 * 4\,000 \text{ Lb/in}^2 * (18 \text{ in})^2) = 716\,040 \text{ Lb} = 716,04 \text{ Kip.}$$

$$f_p = 716,04 \text{ Kip.} \geq P_U = 435,6 \text{ Kip.} \Rightarrow OK:$$

FUERZA PERMISIBLE DE APOYO EN EL CONCRETO DE LA ZAPATA.

$$f_p = \phi * (0,85 * f'_c * A_g) * \sqrt{\frac{A_0}{A_g}} \quad \text{Donde: } \sqrt{\frac{A_0}{A_g}} \leq 2$$

$$\sqrt{\frac{A_z}{A_g}} = \sqrt{\frac{3,0 * 3,0}{1,5 * 1,5}} = \sqrt{\frac{9,0}{2,25}} = \sqrt{4,0} = 2,0 \leq 2$$



LA RELACION $\sqrt{\frac{A_0}{A_G}}$ SE ASUME IGUAL A 2

$$f_P = 0,65 * (0,85 * 4\,000 \text{ Lb/in}^2 * (18 \text{ in.})^2 * 2 = 1\,432\,080 \text{ Lb}$$

$$f_P = 1\,432,08 \text{ Kip.} \geq P_U = 435,6 \text{ Kip.} \Rightarrow OK:$$