

IV.- ANÁLISIS DE LA CIMENTACIÓN.

4.1 Determinación del esfuerzo de contacto

Para la determinación de los esfuerzos de contacto bajo una cimentación, es necesario hacer un análisis de carga para determinar su magnitud.

La cimentación se debe proyectar para soportar carga muerta y carga viva. La carga muerta incluye el peso propio de la estructura, el peso del material de relleno y el peso propio de la cimentación. La carga viva se estima mediante los códigos de la construcción que generalmente permiten una reducción a veces hasta del 50%, según el área que se va a apoyar, es necesario hacer un análisis especial cuando la carga viva es vibratoria o se encuentran impactos altos.

La cimentación debe ser capaz de soportar dentro de un margen de seguridad razonable, la carga máxima a la cual vaya a quedar sujeta aunque esta ocurra muy brevemente o una sola vez en la vida de la estructura.

El asentamiento y el esfuerzo de contacto deben estimarse basándose en la carga muerta, mas la mejor estimación posible de la carga viva permanente, y no tomar en cuenta la carga viva máxima.

Los esfuerzos de contacto se distribuyen uniformemente bajo la cimentación, Éste se obtiene de dividir la sumatoria de las cargas aplicadas y el área total de contacto Figura 9,10 y

11

$$q_a = \frac{\sum P}{\sum A} = \frac{P_m + \%P_v + P_c + P_r}{A}$$

Donde:

q_a = Esfuerzo de contacto promedio suelo-cimentación

P_v = Carga viva

P_m = carga muerta

P_c = Peso de la cimentación

P_r = Peso del material de relleno

A = Área total de la cimentación

A_1 = Área de la zapata de lindero

A_2 = Área de la zapata central

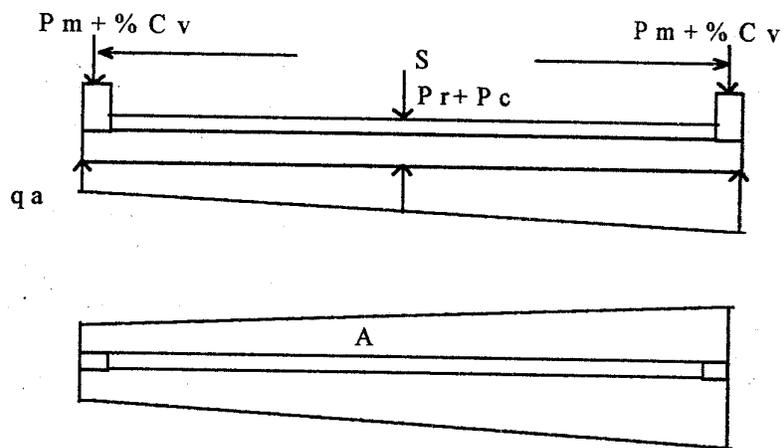


Figura 9. Esfuerzo de contacto en zapata trapezoidal

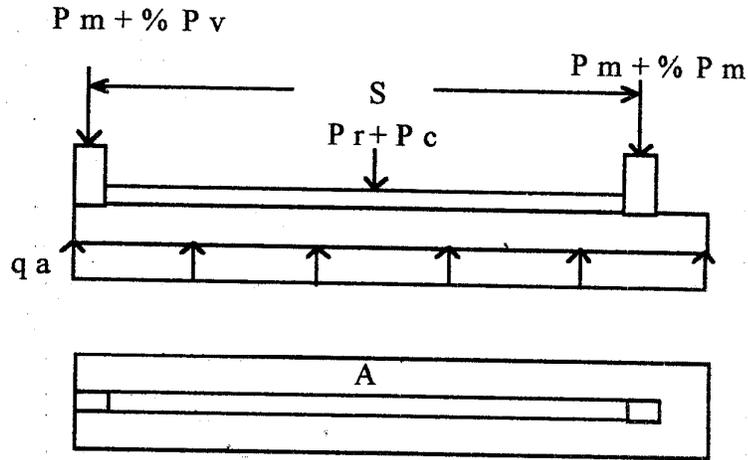


Figura 10. Esfuerzo de contacto en zapata rectangular

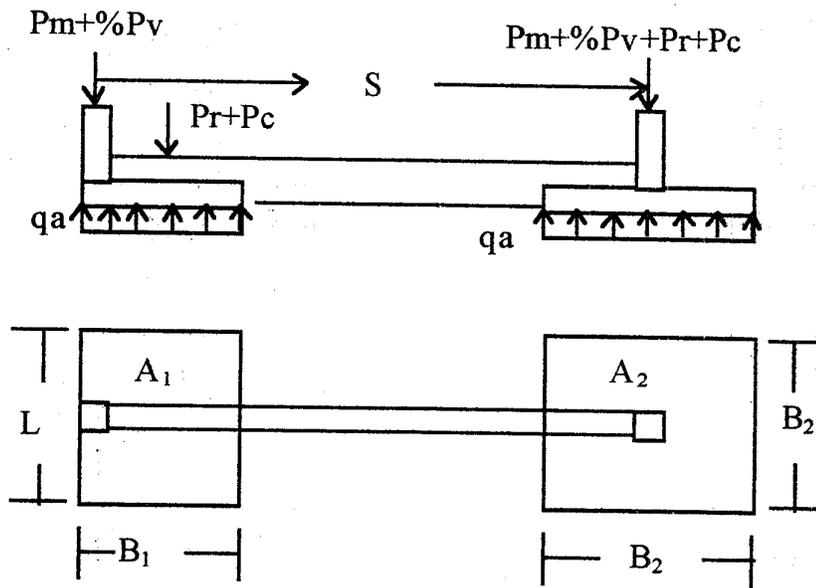


Figura 11. Zapatas aisladas unidas con trabe de liga

4.2 Estimación del asentamiento

Para la estimación de asentamientos a largo plazo o asentamientos por compresión de cada estrato de suelo se calcula usando el esfuerzo efectivo inicial, el incremento en el esfuerzo efectivo debido a la aplicación de una sobrecarga y la curva de compresibilidad.

El esfuerzo efectivo inicial en cada estrato es igual al esfuerzo inicial en la mitad del estrato; estos aumentan en proporción directa con la profundidad, sin embargo el incremento en el esfuerzo efectivo no es igual al esfuerzo en la mitad del estrato, porque la relación entre el incremento de esfuerzo y la profundidad no es lineal. Figura 12.

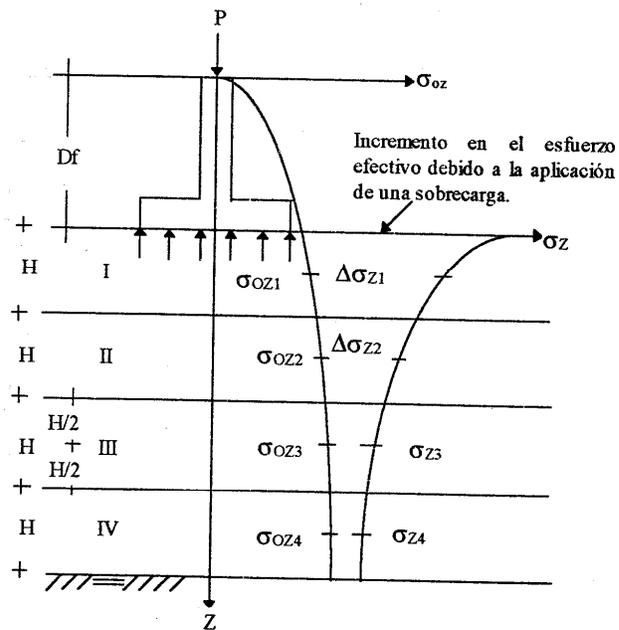
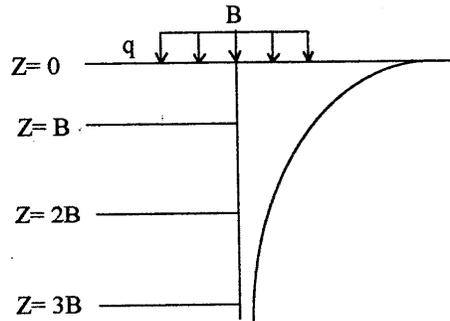
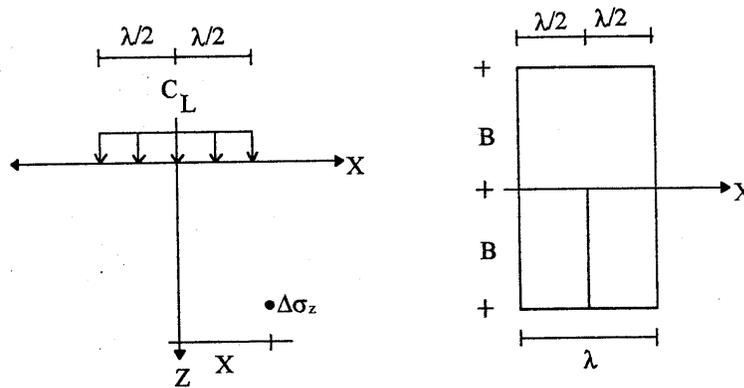


Figura 12. Distribución de esfuerzos en la masa de suelo

Para la obtención más exacta de la distribución de los esfuerzos dentro de la masa de suelo, nos ayudamos con varias teorías de elasticidad. Estas teorías nos demuestran como al aplicar una carga al suelo a medida que aumenta la profundidad, disminuye la concentración de esfuerzos directamente debajo de la carga. Figura 13.



A continuación se muestran las ecuaciones de Frölich, para una carga rectangular uniformemente distribuida.



$$\Delta\sigma_z = q I_\chi$$

$\Delta\sigma_z$ = Incremento en el esfuerzo efectivo a una profundidad Z y a una distancia X del centro de aplicación de la carga

q = Carga uniformemente distribuida

I_χ = Valor de influencia de Frölich

Para $\chi=2$ $\Delta\sigma_z = q I\chi_2$

$$I\chi_2 = \frac{1}{\pi} \left(\alpha_o + \frac{1}{2} \text{Sen} 2\alpha_o \right) (\text{Sen} \psi_1 - \text{Sen} \psi_2)$$

Para $\chi=3$ $\Delta\sigma_z = q I\chi_3$

$$I\chi_3 = \frac{3}{2\pi} \left(\text{Sen} \alpha_o - \frac{\text{Sen}^3 \alpha_o}{3} \right) \left\{ (\psi_1 - \psi_2) + \text{Sen}(\psi_1 - \psi_2) \text{Cos}(\psi_1 + \psi_2) \right\}$$

Para $\chi=4$ $\Delta\sigma_z = q I\chi_4$

$$I\chi_4 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{3}{2} \alpha_o + \frac{3}{4} \text{Sen} 2\alpha_o + \text{Sen} \alpha_o \text{Cos}^3 \alpha_o \right) \left\{ (\text{Sen} \psi_1 - \text{Sen} \psi_2) - (\text{Sen}^3 \psi_1 - \text{Sen}^3 \psi_2) \right\}$$

$$\alpha_o = \text{Tan}^{-1} \left\{ \frac{B}{\sqrt{X^2 + Z^2}} \right\}$$

$$\psi_1 = \text{Tan}^{-1} \left\{ \frac{X + \lambda / 2}{Z} \right\}$$

$$\psi_2 = \text{Tan}^{-1} \left\{ \frac{X - \lambda / 2}{Z} \right\}$$

χ = Factor de distribución de esfuerzos.

$\chi=2$ Suelo estratificado con diferentes módulos de deformación.

$\chi=3$ Solución de Boussinesq (suelo homogéneo e isotrópico), es decir que sus propiedades mecánicas son las mismas en todos los puntos de su masa e isotrópico, que esas propiedades en un punto dado no varían, en general, en las distintas direcciones del espacio.

$\chi=4$ Suelo donde el módulo de deformación disminuye apreciablemente con la profundidad, como es el caso de los suelos granulares.

Una vez obtenidos los valores de $\Delta\sigma_z$ para los diferentes estratos que componen la masa de suelo hacemos una estimación del asentamiento total.

Por otro lado es muy importante mencionar el tipo de ensaye con el cual se analizarà la muestra de suelo para que sea representativo de las condiciones del lugar. Si es un suelo fino y saturado se le analiza por medio de una prueba de consolidación y para suelos granulares, con el ensaye de compresion triaxial, de tal manera que los asentamientos totales se calculan de la siguiente manera.

$$\delta_z = \sum_{i=1}^n m_{vi} \Delta\sigma_{zi} H_i$$

Para la obtención de asentamientos en un tiempo dado sobre una arcilla saturada, es necesario obtener este en función del tiempo de consolidación, el cual requiere de algún tiempo para efectuarse al 100%, de tal manera que:

$$\delta_t = \delta_T U_t$$

$$\delta_t = m_v F(T) \Delta\sigma_z H$$

$$\delta_t = \delta_T F(T)$$

$$\delta_t = m_t \Delta\sigma_z H$$

$$\delta_T = m_v \Delta\sigma_z H$$

$$m_t = m_v F(T)$$

$$\delta_t = (m_v \Delta\sigma_z H) F(T)$$

$$\delta_t = \sum_{i=1}^n m_{ti} \Delta\sigma_{zi} H_i$$

donde:

δ_t = Asentamiento en un tiempo t

δ_T = Asentamiento total cuando $U_t=100\%$

$F(T)$ = Factor tiempo que es función de U_t

$\Delta\sigma_z$ = Incremento en el esfuerzo efectivo

m_v = Módulo de deformación del suelo

H = Espesor del estrato

m_t = Módulo de deformación del suelo influenciado por el factor tiempo.

Para la obtención de asentamientos en una zapata rígida de forma rectangular, desplantados sobre un suelo homogéneo, se calculan mediante la siguiente expresión.

$$\delta z = \alpha_e B (1 - U^2) M_z q_a$$

donde:

α_e = Factor que es función de B/L, para B=L $\Rightarrow \alpha_e=0.95$

B = Ancho de la cimentación

U = Relación de poisson del suelo

Mz = Módulo de deformación del suelo (Ensaye triaxial)

q_a = Esfuerzo de contacto promedio suelo cimentación

El valor calculado de los asentamientos deberá ser suficientemente pequeño para no causar daños intolerables a la propia cimentación, elementos estructurales, acabados e instalaciones. A continuación se muestran valores límites o permisibles para hundimientos diferenciales en diferentes tipos de estructuras y acabados. Tabla 2

Tipo de estructura o acabado	$\frac{ \delta_{z1} - \delta_{z2} }{L} \leq$ Asentamiento diferencial permisible
Casas de una a dos plantas con muros de carga de ladrillo y para estructuras ligeras.	0.002
Estructuras con acabados interiores y exteriores sensibles, por ejemplo acabado en yeso.	0.001
Estructuras de acero de una a dos plantas, armaduras para techo y almacenes con muros flexibles.	0.006

Tabla 2. Asentamientos permisibles para diferentes tipos de estructuras y acabados.

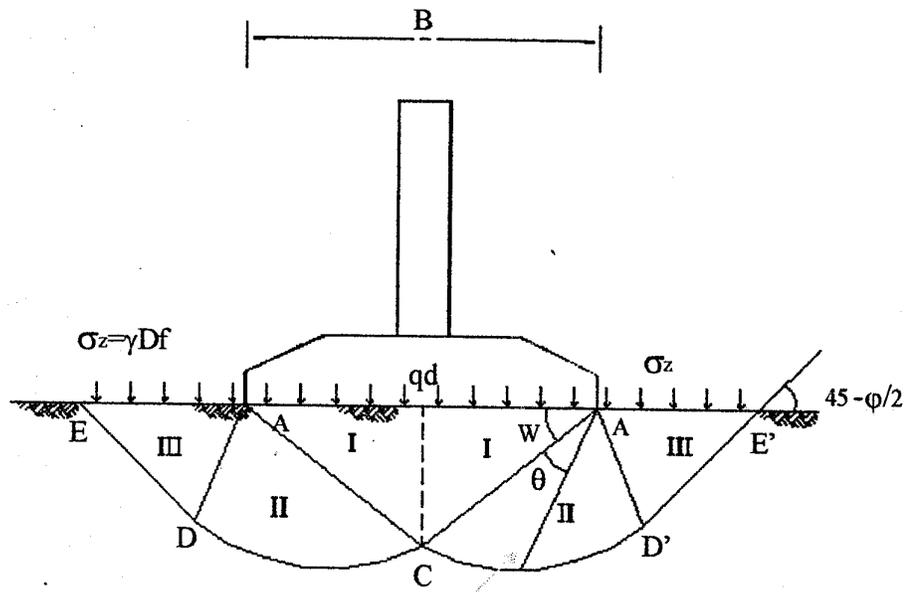
4.3 Revisión por capacidad de carga

La Capacidad de carga de un suelo, es el esfuerzo de contacto que se necesita aplicar a una masa de suelo mediante una cimentación, para producir una falla por esfuerzo cortante.

La capacidad de carga en los suelos depende directamente del ángulo de fricción interno, peso específico del suelo, ancho de la cimentación y de la sobrecarga que existe al nivel de desplante de la cimentación. Es importante mencionar que el ángulo de fricción interno, es el que tiene mayor influencia al calcular el parámetro capacidad de carga.

HIPÓTESIS:

- a) Material Homogéneo e Isotrópico
- b) Resistencia al corte del suelo $S = C + \sigma \tan \phi$
- c) La cuña I se encuentra en estado de equilibrio elástico y las cuñas II y III en estado de equilibrio plástico. La zona I penetra en la masa de suelo, mientras que las zonas II y III se plastifican, es decir se moviliza la máxima resistencia al corte. figura 13



$$r = r_0 e^{\theta \tan \phi}$$

$$W = 45 + \frac{\phi}{2}$$

$$r_0 \cos W = \frac{B}{2} \Rightarrow r_0 = \frac{B}{2 \cos W}$$

figura 13. Mecanismo de falla por capacidad de carga de una cimentación poco profunda

Para la solución al parámetro capacidad de carga, Terzaghi analiza el caso más general de suelos con “Cohesión y Fricción”. Se puede decir que es la teoría más usada en la mecánica de suelos para el cálculo de capacidad de carga, en particular para cimentaciones superficiales, donde el ancho de la cimentación es igual o mayor que la profundidad de desplante del cimiento. La teoría de Terzaghi hace referencia a dos tipos de falla por esfuerzo cortante.

Falla local:

En un suelo se presenta la falla de tipo local cuando este es muy compresible o puede tolerar grandes deformaciones. Terzaghi considera que al penetrar el cimiento no logra desarrollarse el estado plástico hasta puntos tan lejanos como el “E”, sino que la falla ocurre antes a carga menor por haberse alcanzado un nivel de asentamiento en el cimiento equivalente a la falla del mismo; dicha falla se da en suelos cohesivos blandos y suelos granulares en estados suelto.

Falla general:

En este tipo de falla sucede lo contrario a la antes mencionada. Al penetrar el cimiento en el suelo, se va produciendo cierto desplazamiento lateral y se plastifican por completo las zonas II y III ; esto sucede en suelos cohesivos rígidos y suelos granulares en estado muy compacto.

Es importante mencionar que para el análisis por capacidad de carga se requiere conocer el ancho de la cimentación, así como el tipo de cimentación para la cual se realizará el análisis. En este trabajo se estará haciendo referencia a zapatas aisladas o en un momento dado a zapata corrida, cuando la longitud de la cimentación sea mayor o igual que seis veces el ancho de la misma. A partir del tipo de cimentación que se decida utilizar se determinarán los factores de forma correspondientes a la misma. Tabla No. 3

En el análisis por capacidad de carga del suelo, se dirá que existirá una falla del tipo local cuando la compacidad relativa del suelo sea menor que 0.90 y se hablará de falla general cuando la compacidad relativa sea mayor que 0.90.

A continuación se muestran las ecuaciones para el cálculo del parámetro capacidad de carga para zapatas aisladas y zapatas corridas con suelos cohesivos y suelos granulares. También se muestran las ecuaciones correspondientes a los factores de capacidad de carga para una falla general, así como las ecuaciones de cohesión y ángulo de fricción para una falla local.

Zapatas corridas

$$q_d = C N_c + \sigma_z N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$$

$$q_d = (\sigma_z N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma) (C_r + 0.10)$$

Zapatas aisladas

$$q_d = \alpha_1 C N_c + \alpha_2 \sigma_z N_q + \alpha_3 \gamma B N_\gamma$$

$$q_d = (\alpha_2 \sigma_z N_q + \alpha_3 \gamma B N_\gamma) (C_r + 0.10)$$

Factores de capacidad de carga

$$N_q = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi$$

$$C' = \frac{2}{3} C$$

$$\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3} \tan \phi \right)$$

q_d = Capacidad de carga última

C = Cohesión del suelo

σ_z = Esfuerzo vertical efectivo a la profundidad de desplante de la cimentación

γ = Peso volumétrico del sub-suelo de cimentación

B = Ancho de la cimentación

N_c, N_q, N_γ = Factores de capacidad de carga

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ = Factores de forma de la cimentación

C_r = Compacidad relativa

Las ecuaciones anteriores de capacidad de carga, son las correspondientes a suelos granulares y suelos con cohesión para un mecanismo de falla del tipo general. Para el mecanismo de falla del tipo local se hará uso de las mismas ecuaciones, únicamente que se reducirá la cohesión y el ángulo de fricción en un tercio del valor correspondiente a una falla general.

	α_1	α_2	α_3
Zapata corrida	1	1	0.50
Zapata aislada	1.20 – 1.30	1.20	0.30 – 0.40

Tabla 3. Factores de forma.

La capacidad de carga admisible, siempre deberá ser menor que la correspondiente a la falla y existirá un amplio margen de seguridad para protegerse de todas las incertidumbres referentes a las propiedades del suelo, a la magnitud de las cargas manejadas y a la teoría manejada en el análisis.

Existe un factor de seguridad contra la falla por capacidad de carga, el cual se obtiene de dividir la capacidad de carga última del suelo y el esfuerzo de contacto promedio suelo cimentación.

$$F.S = \frac{q_d}{q_a}$$

Los valores utilizados en la práctica pueden variar dependiendo de la importancia de la obra y de la magnitud de las incertidumbres que se manejen. Es recomendable utilizar un factor de seguridad de 3 cuando en el análisis de carga sólo se consideren cargas permanentes. Cuando en el análisis cargas permanentes y cargas vivas eventuales, el valor anterior puede reducirse de 2.5 a 2.0.