



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERÍA
División de Ingeniería Civil y Geomática

Análisis y diseño de una cimentación superficial de una estructura.

Tesis profesional
para obtener el título de:
Ingeniero Civil
Área:
Geotécnica

Presenta:
López Grovas José Francisco Manuel

Director de tesis:
Héctor Sanginés García



Ciudad Universitaria, México, Noviembre 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Contenido:

Introducción:.....	4
Análisis Estructural.....	5
Sismo.....	6
Aceleración:.....	7
Velocidad del movimiento del suelo:.....	7
Desplazamiento del movimiento del suelo:.....	8
Análisis Geotécnico:.....	9
Compresión simple:.....	10
Criterio de falla, círculos de Mohr-Coulomb:.....	11
Odómetro o Consolidómetro:.....	13
Gráficas de esfuerzo-deformación:.....	13
Parámetros:.....	13
Peso específico "γ":.....	13
Densidad relativa "Dr":.....	14
Ángulo de fricción interna "Φ":.....	14
Límites de Atterberg:.....	14
Deformaciones:.....	15
Capacidad de carga :.....	15
Cimdeca.....	16
I Deformación:	18
$\Delta_{total} = \delta_e + \delta_p + \delta_s L$	18
$\Delta_p = M \nu \sigma_z H U L$	19
$\Delta_s = M t \sigma_z H \log(1 + \xi T) L$	20
Factores que influyen en la deformación:.....	21
Tipo de suelo:.....	21
Suelos puramente cohesivos, totalmente saturados:.....	21
Suelos puramente cohesivos, parcialmente saturados:.....	21
Suelos puramente friccionantes:.....	22
Distribución e incrementos de esfuerzos:.....	22
Espesor del estrato:.....	23
Pruebas de laboratorio:.....	23
¿Cómo se calcula?.....	24
$\Delta_{total} = \delta_e + \delta_p + \delta_s L$	24
II Capacidad de carga:	26
Capacidad de carga resistente:.....	26
Factores que influyen en la capacidad de carga:.....	26
Tipo de suelo:.....	27
Forma de la cimentación:.....	30
Pruebas de laboratorio:.....	30
Compresión triaxial:.....	30

¿Cómo se calcula?.....	31
III Diseño estructural:	33
Diseño de cimentaciones:	33
Factores a considerar en el diseño:.....	33
Tipo de cimentación:.....	33
Combinación de cargas:.....	39
¿Cómo se dimensiona?:.....	44
Sismo:	44
IV Análisis y diseño de una cimentación:	46
V Conclusión:	63
Apéndice:	65
Bibliografía:	66

Introducción:

Durante la elaboración de una construcción es sumamente necesario realizar un análisis detallado sobre la forma de cimentación que soportará todas las acciones impuestas tanto por la naturaleza como por el hombre.

El programa de Excel creado para el análisis de cimentaciones someras permite, a través de las ecuaciones desarrolladas para predecir el comportamiento del suelo, darnos una idea sobre los movimientos de deformación y capacidad de carga que se presentarán en la masa de suelo en cuestión. El análisis para una cimentación somera, inmerso en el programa, recaba la mayor información posible sobre un punto de análisis y a continuación muestra el resultado para su interpretación ingenieril.

Para el diseño de una edificación es indispensable conocer las propiedades del suelo sobre el cual se va a construir, por lo que se realiza un muestreo sobre toda la masa de suelo que será utilizada para el proyecto. A las muestras de suelo obtenidas se les aplica una serie de pruebas (con todas sus variantes) como:

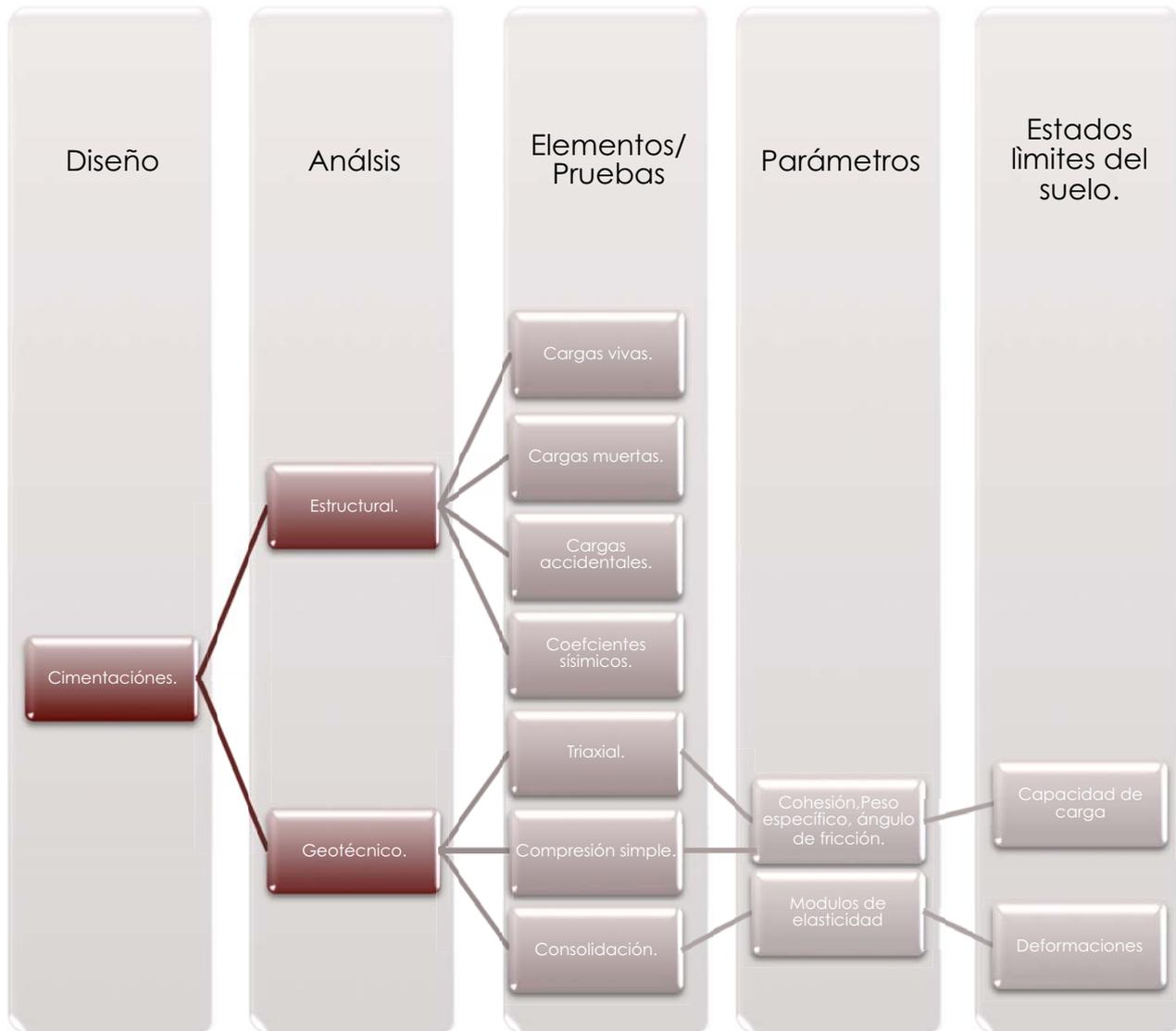
1. Compresión Triaxial.
2. Consolidometro.

Estas pruebas nos mostrarán una lista completa de parámetros que nos serán de utilidad para conocer el comportamiento de la masa del suelo analizada.

1. El ángulo de fricción interna del suelo ϕ .
2. El módulo de deformación del suelo **Me**.
3. Cohesión del suelo **c**.

Teniendo estas parámetros (entre otros más) como datos podemos comenzar a realizar un análisis sobre el comportamiento del suelo y la cimentación, a continuación se muestra el desarrollo sugerido para el diseño de cimentaciones.

Durante la selección de una cimentación adecuada es de suma ayuda tener preparados los siguientes datos:



Análisis Estructural

Al momento de elegir el tipo de cimentación es necesario encontrar las "cargas" que llegan desde el edificio hasta la cimentación, y de ahí, a la forma en que se transmiten al suelo mismo. Todo este proceso debe realizarse con base al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2004).

Las cargas que se requiere conocer para el análisis estructural son:

Cargas muertas (acciones permanentes)	Cargas Vivas (acciones variables)	Cargas Accidentales (acciones accidentales)
<ul style="list-style-type: none">• Esto es el peso propio del edificio.	<ul style="list-style-type: none">• Movimientos de mobiliario y personal.	<ul style="list-style-type: none">• Son las debidas a sismos y vientos.

Tomando en cuenta estas cargas sabemos que, aún en el proceso mismo de la construcción de una edificación, se puede presentar una combinación de los tres tipos de cargas. Las combinaciones se clasifican de acuerdo a la probabilidad que tienen de ocurrir al mismo tiempo entre ellas, en consecuencia tenemos las siguientes combinaciones: comunes y excepcionales.

De acuerdo con el R.C.D.F(2004) las combinaciones comunes tienen la característica de incluir la carga muerta (el peso propio de la edificación) más la carga viva (con su máximo valor).

En el caso particular de análisis para cimentaciones someras se propone, con base al reglamento, tomar en cuenta las siguientes dos combinaciones:

Combinaciones	
Primera	Segunda
Carga muerta + Carga viva máxima	Carga muerta + Carga viva +Carga accidental
Estados Límites de falla (capacidad de carga)	

Realizar un análisis con estas dos combinaciones tiene como objetivo elevar la seguridad de la misma edificación, cubriendo los escenarios posibles que podrían suceder mientras tenga un uso la construcción.

Sismo

El dimensionamiento por medio del concepto de sismo recae en el hecho de no solo diseñar la cimentación que resista para conjunto de cargas estáticas, sino que también pueda absorber efectos sísmicos.

Las teoría de placas tiene su origen en el movimiento de la litósfera, ahora es posible que se presenten 3 tipos de movimientos, como: hundimiento, deslizamiento o elevación.

Tomando en cuenta el movimiento de las placas tectónicas observamos que la fricción generada entre las mismas placas producen esfuerzos sumamente importantes que pueden o no liberarse de manera instantánea. Esta liberación de energía produce ondas en la corteza terrestre (ondas de longitudinales P con mayor amplitud y velocidad que las ondas S), éstas se transmiten a gran velocidad generando vibraciones que percibimos como sismos en la superficie terrestre.

Para poder tomar en cuenta los efectos de un sismo y su efecto en nuestra estructura (hasta la cimentación) es necesario tomar en cuenta parámetros como:

- 🍏 La aceleración:
- 🍏 Velocidad del movimiento del suelo:
- 🍏 El desplazamiento del movimiento del suelo:

Aceleración:

Para poder conocer la aceleración de las ondas sísmicas necesitamos de una acelerógrafo, el cual crea un registro llamado acelerograma que muestra las 3 componentes de un sismo.

El análisis de las ondas registradas por el acelerógrafo permite mostrar la aceleración máxima, duración de las ondas, las frecuencias dominantes y la intensidad del sismo, la cual se muestra con mucha más precisión que con la escala de Mercalli.

En la estructura completa las aceleración verticales no presentan efectos apreciables (solo cerca del epicentro), sin embargo las aceleraciones horizontales son las responsables de los daños en las estructuras.

Velocidad del movimiento del suelo:

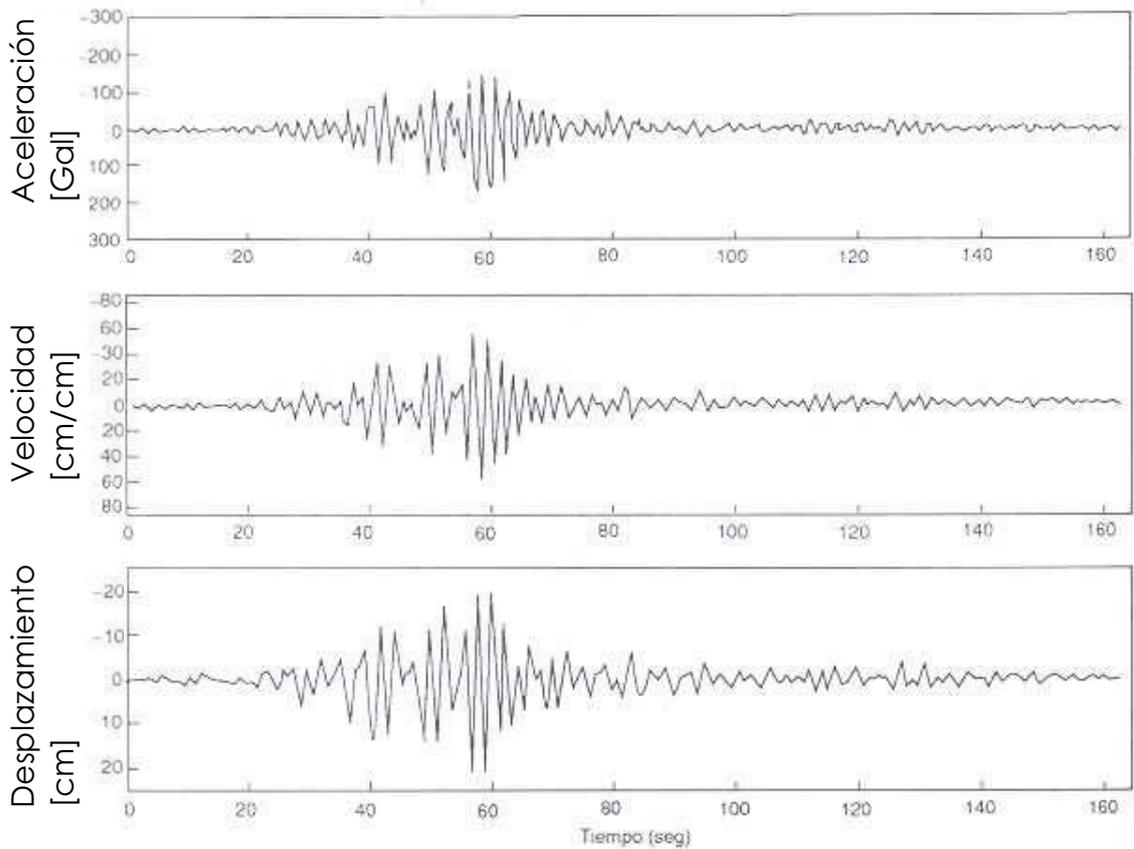
Para cualquier estructura observamos que los efectos devastadores de un sismo se encuentran compuestos por la intercalación de vibraciones armónicas (mismo periodo entre la construcción y el sismo) y por inestabilidad del suelo (fenómenos de licuación en arenas, deslizamiento de laderas).

Desplazamiento del movimiento del suelo:

Los movimientos del suelo hacen que la capacidad de carga se reduzca a cero, tal es el caso de la licuación: las arenas, al encontrarse saturadas y recibir las ondas producidas por un sismo, pierden su fricción interna y adquieren un comportamiento totalmente líquido.

Los parámetros (aceleración, velocidad y desplazamiento) pueden observarse en el terremoto de 1985 en la ciudad de México con los siguientes registros.

Se observa en la primer registro que la aceleración tuvo una magnitud reducida en comparación a otros sismos ocurridos en la capital, sin embargo se presentaron desplazamientos extraordinarios de hasta unos 20 cm. En base a estos resultados se concluye que el concepto de aceleración no es lo suficiente como para poder indicar la intensidad del sismo por lo que se necesita realizar un análisis complementario de velocidad y desplazamiento del movimiento del suelo.



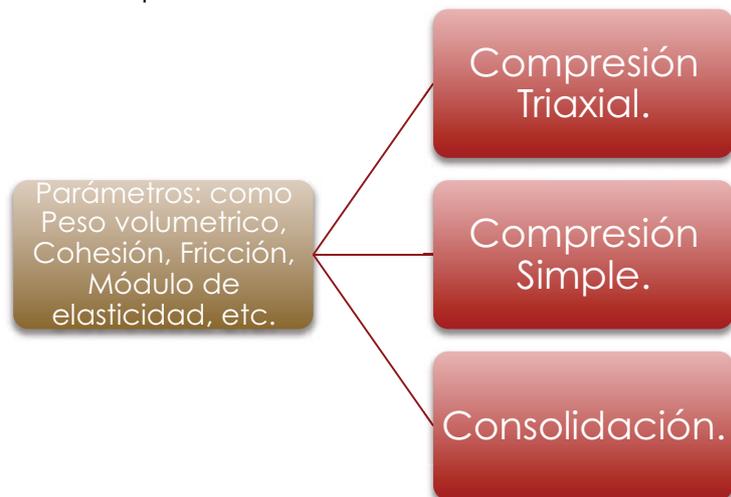
Sismo de 1985, México 1

Análisis Geotécnico:

Para un diseño adecuado no solo es imprescindible conocer y prever todas combinaciones de cargas que tendrá nuestra edificación sino también es de suma importancia entender la interacción suelo-estructura y las reacciones del mismo ante la presencia de elementos mecánicos.

Entender la interacción suelo-estructura lleva implícita una serie de pruebas de laboratorio, éstas a su vez nos muestran resultados (o parámetros) que nos son de gran utilidad al momento de calcular la deformación y capacidad de carga última del suelo.

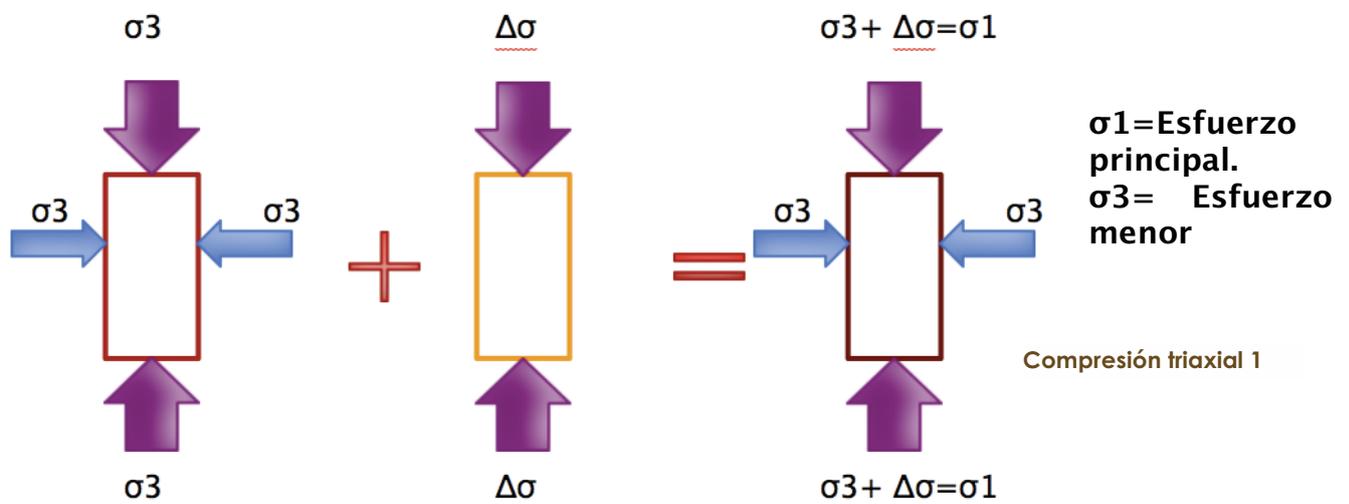
Las tres pruebas mostradas a continuación nos proporcionan los siguientes parámetros útiles en el diseño y revisión de cimentaciones. Toda clase de suelo puede estar sujeta estas pruebas de laboratorio ya que no son exclusivas de un solo tipo de suelo.



Compresión triaxial:

Las muestras deben ser cilíndricas y envueltas en una membrana que impide el flujo de agua a través de ella; a continuación se lleva a la falla por cortante aplicando una fuerza axial sobre la muestra.

Existe una variante de la compresión triaxial y esta es la compresión simple.



Compresión simple:

Esta prueba consiste en encontrar la relación esfuerzo-deformación siguiendo el mismo proceso que se realiza en una compresión triaxial, la diferencia se da al aplicar la fuerza axial sin la ayuda de líquido alrededor de la muestra.

Por medio de la prueba triaxial no solo podemos encontrar el esfuerzo desviador, el cual es simplemente la resta entre el esfuerzo principal menos es esfuerzo menor ($\sigma_1 - \sigma_3$), sino podemos controlar las condiciones de drenado para distintos tipos de suelo, como lo son:

Drenado de la muestra	Siglas en Inglés
Consolidada - drenada.	CD(Consolidated-Drained)
No consolidada - no drenada.	UU(Un consolidated-Un drained)
Consolidada - no drenada.	CU(Consolidated-Un drained)

Estas tres variantes nos indican la condición de drenado de la muestra del suelo de la siguiente manera: antes de fallar por presencia del esfuerzo cortante – después de fallar por efecto del esfuerzo cortante

CD (Consolidada-drenada): A esta condición particular se le conoce como prueba lenta ya que la aplicación del esfuerzo cortante se realiza de manera lenta y sin exceder la presión en los espacios vacíos del suelo. Esta condición se enfoca a arenas, ya que, éstas tienen un alto grado de permeabilidad y por ende se consolidan rápidamente

CU (Consolidada - No drenada): Al permitir la expulsión de agua a través de la muestra mientras que se aplique presión se presentará un fenómeno de consolidación hasta llegar a la falla

UU (No consolidada – No drenada): Este tipo de condición nos indica que al aplicar presión a la muestra cilíndrica se hará de manera tal que se impida el flujo de agua, y al alcanzar la falla por cortante se continuará con la característica de evitar el flujo de agua a través de la muestra.

Con los resultados obtenidos de las pruebas: triaxial y simple podemos hacer un análisis por medio de círculos de Mohr para encontrar la los parámetros característicos del suelo en cuestión.

Criterio de falla, círculos de Mohr-Coulomb:

Debido a que la capacidad de carga recae en qué tanto puede soportar el suelo ante esfuerzos cortantes, es importante encontrar una representación gráfica de estas fuerzas. Los círculos de Mohr, a través de una gráfica, crean una representación bidimensional de la distribución de esfuerzos en un cierto punto del suelo.

Este análisis fue diseñado por Otto Mohr alrededor en el siglo XVIII con la premisa de poder detectar el punto en el que el material iba a “fallar”, este punto de quiebre se alcanza al momento en que el esfuerzo cortante alcanza al plano del esfuerzo normal σ

Charles-Augustin de Coulmb no solo incursionó en fuerzas electrostáticas, sino también se vio inmerso en la mecánica de suelos proporcionando una ecuación que calcula el valor del esfuerzo cortante más un aumento directo en la fuerza debida a la presencia de suelos cohesivos.

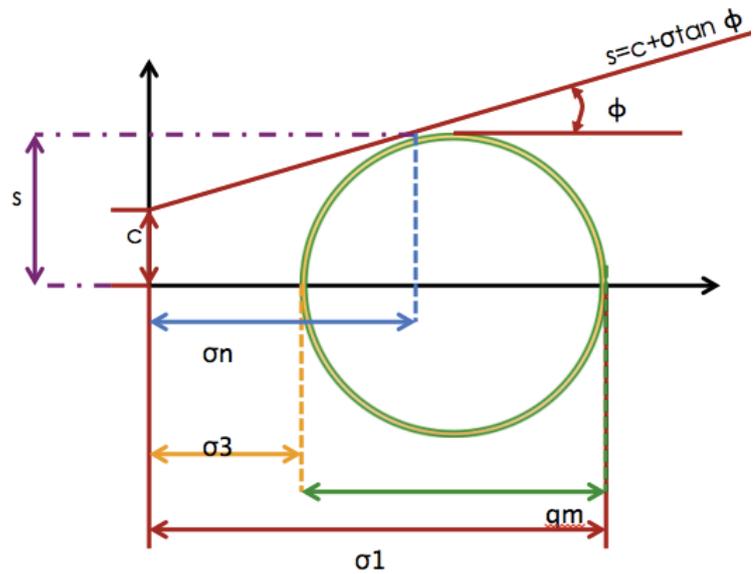
$$s = c + \sigma_n \tan \phi$$

Donde:

- s:** es la magnitud del esfuerzo cortante.
- c:** Es un parámetro que representa la cohesión del suelo en cuestión (Independiente del esfuerzo aplicado).
- ϕ :** Es un parámetro que indica la magnitud del ángulo interno del suelo en cuestión (Dependiente del esfuerzo aplicado).
- σ :** Indica la magnitud de los esfuerzos normales en la superficie de la muestra de suelo.

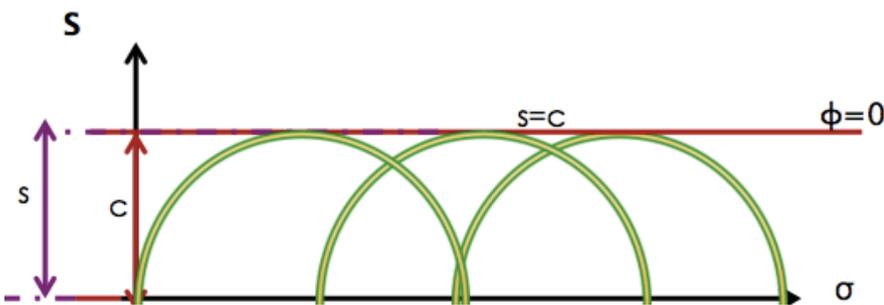
Por medio de la prueba triaxial obtenemos tres parámetros importantes:

- 🍏 Cohesión del suelo "c".
- 🍏 Ángulo de fricción interna del suelo "φ".
- 🍏 Módulo de deformación "Me".

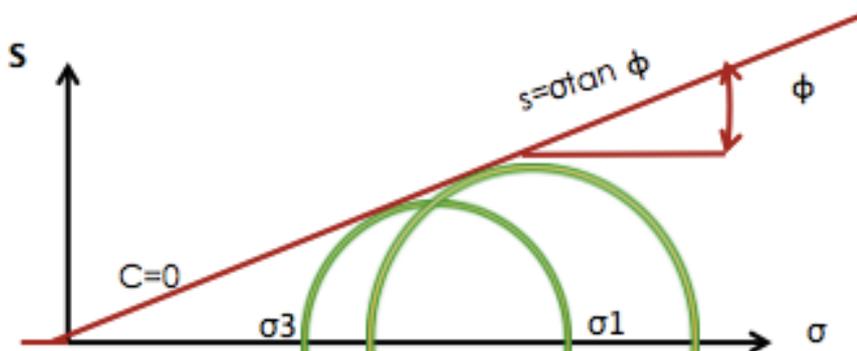


La recta de esfuerzo cortante o plano de falla es característico de cada tipo de suelo, de ahí que sea un parámetro para encontrar el punto que falla el material bajo una cierta combinación de esfuerzos normales y cortantes.

De acuerdo al tipo de suelo podemos observar los siguientes comportamientos que se obtiene del plano de falla para suelos cohesivos y friccionantes.



Suelos cohesivos 1



Suelos friccionantes 2

Odómetro o Consolidómetro:

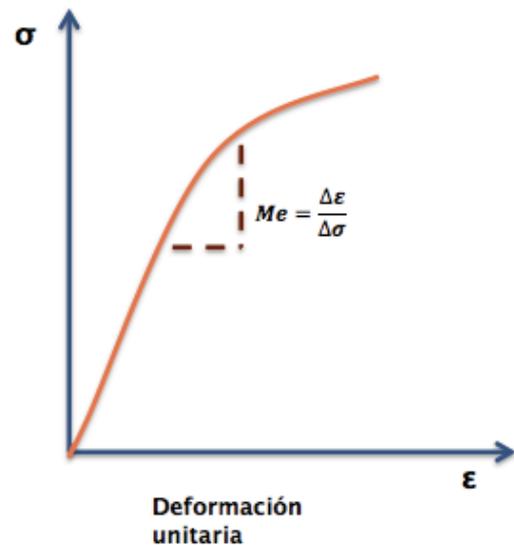
Es una prueba que se realiza con el objetivo de simular una consolidación unidimensional y si bien arroja buenos resultados con distintos tipos de suelo ésta se enfoca a la compresibilidad de arcillas totalmente saturadas.

Esta prueba se lleva a cabo confinando, por medio de anillos metálicos, la muestra de suelo para impedir la deformación lateral, pero permitiendo que se expulse la fracción de agua (por una piedra porosa) al momento de presentarse una carga externa.

Gráficas de esfuerzo-deformación:

En la prueba del consolidómetro se aumenta la carga aplicada poco a poco y durante cada intervalo de incremento de carga se establece una relación esfuerzo deformación que puede observarse en un análisis gráfico denominado esfuerzo deformación y así poder obtener:

- 🍏 $a_v =$ Coeficiente de compresibilidad.
- 🍏 $M_e =$ modulo de deformación.
- 🍏 $\sigma_{vo} =$ Esfuerzos efectivos.



Parámetros:

Esta serie de pruebas y de análisis son de manejo elemental, para poder conocer el comportamiento del suelo ante cargas externas, como lo es la construcción de una obra civil; es por esta razón que los siguientes parámetros son de vital importancia:

Peso específico " γ ":

Es lo que se conoce como peso sobre volumen, además la magnitud varía dependiendo de la cantidad de agua presente, por ello se consideran las siguientes relaciones.

$$\gamma = \rho g; [ML^{-2}T^{-2}]$$

100% Saturado	Solidos	Agua
$\rho_{saturado} = \frac{M}{V}$	$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$	$\rho_w = \frac{M_w}{V_w}$

Densidad relativa "Dr":

Es un parámetro que nos ayuda a observar qué tan suelta o densa se encuentra la muestra de suelo, por lo que la manera de obtener esta relación de vacíos se logra:

e es el relación de vacío en sitio del suelo

e_{max} es el estado más suelto del suelo.

e_{min} es el estado más denso del suelo.

$$D_r = \left[\frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \right] 100$$

Esta relación nos indica que a números bajos nos encontramos ante suelos muy densos, al contrario si nos encontramos ante la presencia de números muy altos tenemos suelos muy sueltos.

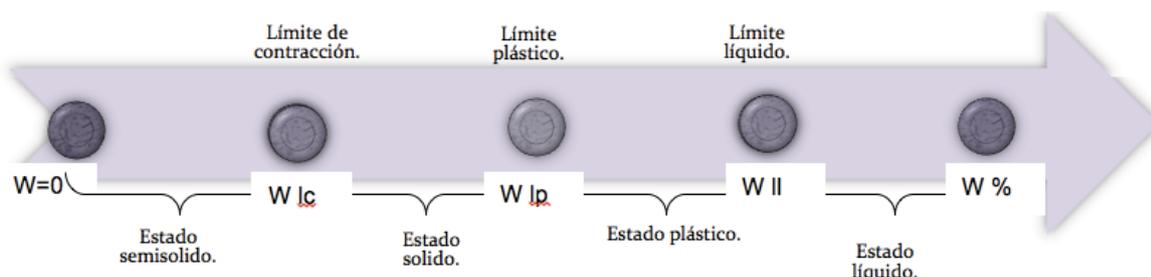
Ángulo de fricción interna "φ":

Debido a que en la naturaleza los suelos granulares presentan partículas de distintas formas y tamaños debemos de tener en cuenta el factor de la densidad relativa muy presente. Estos granos pueden compactarse a través de vibraciones o presentar el fenómeno de licuación ante cargas dinámicas y presencia de agua, y por consiguiente se alterará la fuerza entre partículas. Haciendo referencia a la siguiente tabla podemos encontrar suelos cohesivos que son:

Dr %	Suelo de forma
0-15	Muy suelta
15-50	Suelta
50-70	Medianamente densa
70-85	Densa
85-100	Muy densa

Límites de Atterberg:

Los límites de Atterberg nos muestran que el índice de plasticidad y el límite líquido son parámetros importantes para la determinación de las características de una arcilla:



Los parámetros antes descritos son de apoyo para poder encontrar la magnitud de los hundimientos que sufrirá la estructura a construirse, y la manera en que la cimentación (dependiendo si es una cimentación somera o profunda) distribuye los esfuerzos hacia la masa de suelo.

Al tener el conocimiento de todos estos parámetros podemos observar que por lo general estos suelos presentan los siguientes valores (Siempre que se pueda se debe realizar un muestreo en el área a construir).

Tipo de suelo	Peso específico γ [ton/m ³]	Angulo de fricción interna Φ [°]
Arcilla de compactad promedio	1.60-1.80	25-35
Arena limosa	1.80-1.90	23-30
Arenas (baja permeabilidad)	1.90-2.10	25-35
Arenas (alta permeabilidad)	1.80-1.90	33-40

Deformaciones:

Conocer los efectos que se tiene al colocar una carga (provocada por la estructura) de proporciones muchísimo mayores a las que a experimentado el suelo en toda su historia, requiere de una serie pruebas que nos proporcionen información detallada sobre el comportamiento del suelo.

Capacidad de carga :

Nos referimos al concepto de capacidad de carga cuando deseamos conocer la capacidad al corte que puede resistir el suelo.

Debemos saber que el esfuerzo sobre el suelo, como concepto, es una idealización sobre la manera en que se aplica fuerza sobre una fracción de área. La idealización se da porque la masa de suelo es una suma de fracciones sólida, líquida y vacíos, por lo que la fuerza aplicada

puede distribuirse en cualquier fracción de suelo y dar como resultado los siguientes casos:

- Los esfuerzos que recaen sobre la fracción que contiene "burbujas" de aire y en tal caso sería dividir fuerza entre área igual a 0.
- Los esfuerzos que recaen sobre las partículas de suelo y sería dividir la fuerza entre un área de contacto (entre granos) muy pequeña y el esfuerzo sería extremadamente alto.



Muestra de masa de suelo 1

Así que para evitar estas variaciones de esfuerzos debidas al área, se considera al suelo como medio continuo.

CimDeCa.

CimDeCa es el nombre de el programa de análisis de cimentaciones en Excel.

El programa puede hacer análisis de **Deformaciones** y **Capacidad de carga** para cimentaciones someras como: Zapatas aisladas, Zapatas continuas y losas de ahí el nombre utilizado. Además de hacer análisis para deformaciones y capacidad de carga para cualquier tipo de suelo y nivel de aguas freáticas, nos revisa y diseña la cimentación somera tomando en cuenta los elementos mecánicos y fuerzas generadas por sismos.

Debido a que el programa necesita de parámetros tanto del suelo como datos generales de la edificación es necesario contar con los conocimientos a nivel licenciatura de estructuras y geotécnica; acompañado de estos conocimiento a lo largo del escrito se mostrarán, especificarán las ecuaciones utilizadas para cada caso particular y se realizarán ejemplos utilizando el programa de cimentaciones.

CimDeCa tiene por objetivo reducir el tiempo que se le dedica a calcular la capacidad de carga para una cimentación y las deformaciones que presentará una estructura, esto nos sirve para poder tener una gama de soluciones más amplia y con ello tomar mejores decisiones.

Deformación

1



Deformación:.....	18
$\delta_{total} = \delta_e + \delta_p + \delta_{sL}$	18
$\delta_p = Mv\sigma_z H U_L$	19
$\delta_s = M\sigma_z H \log(1 + \xi T) L$	20
Factores que influyen en la deformación:.....	21
Tipo de suelo:.....	21
Suelos puramente cohesivos, totalmente saturados:	21
Suelos puramente cohesivos, parcialmente saturados:	21
Suelos puramente friccionantes:	22
Distribución e incrementos de esfuerzos:.....	22
Espesor del estrato:	23
Pruebas de laboratorio:	23
¿Cómo se calcula?	24
$\delta_{total} = \delta_e + \delta_p + \delta_{sL}$	24

Deformación:

Se conoce a la deformación como a la re-acomodación de las partículas del suelo causadas por un incremento de carga.

La superposición de una carga ante el suelo presenta efectos de deslizamiento y giros entre las partículas. Se le da el nombre de asentamiento aquel movimiento de la masa de suelo que reduce su volumen, mientras que el caso contrario conoce como expansión.



Asentamientos excesivos causan daños a cualquier estructura, inclusive a construcciones aledañas, por lo que es de suma importancia conocer qué tanto se asentará el suelo y cuánto tiempo le tomará hacerlo. La manera de predecir la deformación total es tomando encuentra 3 factores:

$$\delta_{total} = \delta_e + \delta_p + \delta_s[L]$$

1

Donde:

δ_e = Se trata de la asentamiento inmediato.

δ_p = Se trata de la consolidación primaria.

δ_s = Se trata de la consolidación secundaria.

✚ La asentamiento inmediata, se da bajo dos características:

1.- Suelo no drenado, y.

2.- La premisa de un comportamiento elástico del suelo.

La manera de calcular la deformación inmediata es por medio de las siguientes 2 ecuaciones:

- Ecuación de Steinbrenner



$$\delta_e = \frac{q(1-v)^2}{\pi E} \left[L \ln \frac{(B + \sqrt{L^2 + B^2}) * \sqrt{L^2 + H^2}}{L(B + A)} + B \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + B^2} * \sqrt{B^2 + H^2}}{B(L + A)} \right] + \frac{q}{2\pi E} (1 - v - 2v^2) * H \tan^{-1} \left(\frac{LB}{HA} \right)$$

$$A = \sqrt{L^2 + B^2 + H^2}$$

Donde:

v=Es el módulo de Poisson.

H=Profundidad desde el nivel de desplante hasta el estrato considerado para el análisis [m].

E=Módulo de deformación en [t/m²].

B y L= Son las dimensiones de la cimentación, recordando dividir las entre 2 por calcularse bajo una esquina [m].

- Ley de Hooke:



$$\delta_e = \frac{h_0 [\sigma_z - v * (\sigma_x + \sigma_y)]}{E}$$

σ_z, σ_x y σ_y = Son los esfuerzos calculados a cierta profundidad, ancho y largo [t/m²]

Donde:

v=Es el módulo de Poisson.

E=Módulo de deformación en [t/m²].

Ambas se encuentran codificadas dentro del programa de EXCEL.

- ✚ Consolidación primaria:

Se presenta en cuanto se da el flujo del agua a través de los poros de la porción de masa de suelo, en donde la manera de calcular la consolidación primaria se da tomando la ecuación desarrollada por Juárez Badillo y Rico, 1976.

$$\delta_p = M_v \sigma_z H U [L]$$



Donde:

H=Espesor del estrato donde se encuentra el suelo cohesivo [cm].

M_v=Módulo de deformación del suelo [cm²/kg]

U=f(T)=porcentaje de consolidación en función del tiempo "T" en [s]

σ_z =Esfuerzo en dirección "z" (profundidad en [kg/cm²])

Encontrando el tiempo podemos conocer el valor del porcentaje de consolidación U.

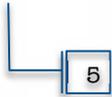
$$T = \frac{C_v t}{H_e^2}$$

Donde:

C_v =Coeficiente de consolidación [cm²/s].

H_e = Es la mitad del espesor del estrato en [cm]

t = Tiempo en que se desea conocer la consolidación primaria [s]



Es importante recordar que el porcentaje de consolidación, esta en función del tiempo que tarda el flujo de agua escapar de lo poros de la fracción de masa del suelo.

✚ Consolidación secundaria:

La consolidación secundaria se hace presente en el momento en que la presión de poro se aproxima a "0", esta condición se da en el momento en que terminan los efectos de consolidación primaria. A continuación se presenta el cálculo de la consolidación secundaria.

$$\delta_s = M_t \sigma_z H \log(1 + \xi T) [L]$$



Donde:

M_t =Módulo de deformación del suelo [cm²/kg].

encuentra el suelo cohesivo [cm].

ξ =parámetros característicos del suelo a analizar [1].

σ_z =Esfuerzo en dirección "z" (profundidad en [kg/cm²])

H =Espesor del estrato donde se

Este tipo deformación es de connotación viscosa, esto por la relación que existe entre las partículas del agua y un suelo cohesivo (las partículas se "resbalan" unas con otras).

Debido a la magnitud tan pequeña de las deformaciones se manejan unidades de longitud, en específico, centímetros. Sin embargo no hay nada que nos impida mostrar el resultado en metros.

Factores que influyen en la deformación:

El efecto de deformación se da en el momento en que se presenta una distorsión y movimiento interno de las partículas que conforman la masa de suelo, por lo que los siguientes elementos juegan un “papel” muy importante en el comportamiento del suelo y en el cálculo mismo de la deformación:

- 🍏 Tipo de suelo.
- 🍏 Distribución e incrementos de esfuerzos.
- 🍏 Espesor del estrato.

Tipo de suelo:

El tipo de suelo (al igual que el nivel freático del agua) es un factor muy importante, ya que, para suelos extremadamente finos como las arcillas tenemos una alta relación de vacío causando una modificación en el módulo de deformación del mismo suelo.

La clasificación de suelos que nos permite hacer distinciones en cuanto al tipo de fórmulas a utilizar va de acuerdo a los parámetros de Φ (ángulo de fricción interna) y c (cohesión) característicos de cada suelo:

- 🍏 Arcillas como suelos puramente cohesivos.
- 🍏 Arenas como suelos puramente friccionantes.

Suelos puramente cohesivos, totalmente saturados:

Nos referimos a este tipo de suelo (arcillas y limos) aquellos que tienen el ángulo de fricción interna $\Phi = 0$ y baja permeabilidad. Observamos que el agua localizada entre los poros de la fracción de masa de suelo es la primera en “tomar” los esfuerzos aplicados, y en el momento en que el agua escapa a través de estos poros se presenta la consolidación.

El efecto contrario se da al momento de realizarse una excavación, sucede que la fracción de espacios vacíos de una masa de suelo son sustituidos por agua, ocasionando que se “hinche” el suelo y se haga presente el fenómeno conocido como expansión.

Suelos puramente cohesivos, parcialmente saturados:

Si bien se conserva la característica de tener un valor de 0 para el parámetro Φ se presentan fenómenos de succión, esto porque, el agua, al abandonar su lugar en la porción de suelo éste es ocupado por aire

provocando un incremento de la presión efectiva y contracción del material.

Suelos puramente friccionantes:

Se considera a suelos totalmente friccionantes aquellas que muestran un valor de 0 para el parámetro c (cohesión). Tienen la característica de presentar compresiones prácticamente instantáneas, esto por su alta permeabilidad.

Distribución e incrementos de esfuerzos:

Existen muchas teorías para calcular la distribución de esfuerzos sobre una porción de suelo, sin embargo para el alcance de esta obra es valido mencionar lo siguiente: Bajo una carga uniformemente distribuida y aplicada a la superficie de la masa de suelo debemos determinar los esfuerzos normales bajo la esquina de la cimentación.

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de distribución de esfuerzos se encuentran en función de la forma en que se aplica una carga en la superficie del suelo.

Boussinesq:

El presente método es ampliamente utilizado, debido a que se calculan los esfuerzos normales bajo una sola esquina de la cimentación con una carga uniformemente distribuida.

El cálculo de esfuerzos se determina en tres dimensiones X, Y y Z.

Para una profundidad Z

$$\sigma_z = \frac{q}{2\pi} \left\{ \left[\left(\frac{1}{x^2 + z^2} \right) + \left(\frac{1}{y^2 + z^2} \right) \right] \frac{xyz}{A} + \tan^{-1} \left(\frac{xy}{zA} \right) \right\}$$

Para una distancia X

$$\sigma_x = \frac{q}{2\pi} \left\{ \left(\frac{\pi}{2} \right) - \left(\frac{xyz}{[x^2 + z^2]A} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{zA}{xy} \right) + [1 - 2\nu] \left[\tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{yA}{xz} \right) \right] \right\}$$

Para una distancia Y

$$\sigma_y = \frac{q}{2\pi} \left\{ \left(\frac{\pi}{2} \right) - \left(\frac{xyz}{[y^2 + z^2]A} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{zA}{xy} \right) + [1 - 2\nu] \left[\tan^{-1} \left(\frac{x}{y} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{xA}{yz} \right) \right] \right\}$$

$$A = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Incrementos de esfuerzos:

Este proceso trata sobre la diferencia entre la presión transmitida al suelo por la misma edificación con la presión de la masa de suelo a nivel del desplante (es la porción de suelo que se removió al excavar).

De acuerdo a las normas de cimentaciones (del R.C.D.F. 2004) se debe calcular:

iii) “Los movimientos diferidos debidos al incremento neto de carga en el contacto cimentación suelo”.

Por lo que se define al incremento de carga como la presión promedio del suelo y la estructura de cimentación, más la presión a nivel de desplante del suelo.

$$q_n = q - p_{vo}$$

10

Donde tenemos que:

q: es la presión promedio que existe en la interacción suelo-cimiento.

p_{vo} : Es la presión del suelo a nivel de desplante.

Espesor del estrato:

El espesor de estrato es proporcional a la deformación, a mayor espesor mayor deformación.

Pruebas de laboratorio:

Las pruebas que se necesitan para poder calcular la deformación del suelo bajo cierta carga se explican a detalle en la introducción, sin embargo se necesita de:

- 🍏 Compresión Isotrópica.
- 🍏 Compresión Confinada.
- 🍏 Compresión triaxial.

Consolidadas-drenadas,
Consolidadas- no drenadas,
No consolidadas-no drenadas



Nos arrojan los siguientes parámetros: Φ , c , M_e y γ_m

Con estos parámetros conocemos el comportamiento del suelo, y por ende tenemos sustentada la elección del criterio que vamos a utilizar para calcular la distribución de esfuerzos.

¿Cómo se calcula?

Para obtener la deformación es necesario puntualizar que a diferencia de los materiales utilizados en las estructuras y los distintos suelos presentan una deformación causada por un comportamiento visco-elástico, otras palabras es mucho más importante la deformación por cambios volumétricos que por cambios en la forma del material.

Considerando esta premisa es correcto mostrar que la manera de calcular una deformación es la siguiente:

1. A través de muestras inalteradas realizamos distintas pruebas en el laboratorio para conocer parámetros como: **Φ , c , M_e y γ_m**
2. Teniendo estos parámetros podemos realizar análisis que nos permitan, con más detalle, describir el comportamiento que presentará el suelo al presentarse cargas externas.
3. Se pasa a calcular, por medio del enfoque de Boussineq, la distribución de los esfuerzos a medida en que el suelo toma cargas externas.
4. Así que, para el proceso del cálculo de la deformación podemos seguir realizar la siguiente suma:

$$\delta_e = \frac{h_0 [\sigma_z - v * (\sigma_x + \sigma_y)]}{E} [L]$$

3

$$\delta_p = M_v \sigma_z H U [L]$$

4

$$\delta_s = M_t \sigma_z H \log(1 + \xi T) [L]$$

6

$$\delta_{total} = \delta_e + \delta_p + \delta_s [L]$$

1

Donde:

δ_{ve} = Se trata de la consolidación inmediata.

δ_p = Se trata de la consolidación primaria.

δ_s = Se trata de la consolidación secundaria.

Capacidad de Carga

2



Capacidad de carga:	26
Capacidad de carga resistente:	26
Factores que influyen en la capacidad de carga:	26
Tipo de suelo:	27
Forma de la cimentación:	30
Pruebas de laboratorio:.....	30
Compresión triaxial:	30
¿Cómo se calcula?	31

Capacidad de carga:

La máxima resistencia del suelo ante la presencia de esfuerzo cortante, es así a lo que se conoce como la capacidad de carga última. Este estado límite nos indica todos los esfuerzos que el suelo puede aguantar antes de presentar daños irreparables; la manera de calcular la capacidad de carga es:

$$q_d = cN_c + p_v N_q + 0.50 \gamma B N_\gamma$$

De donde podemos calcular:

$$\bullet N_c = \frac{(N_q - 1)}{\tan \phi}$$

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

$$\bullet N_\gamma = \frac{2(N_q + 1)}{\tan \phi}$$

11

12

13

14

Capacidad de carga resistente:

Este concepto simplemente hace una reducción del valor de la capacidad de carga última con el fin de minimizar la incertidumbre que se tiene ante las propiedades índice del suelo (como lo es el ángulo de fricción interna, el módulo de deformación, cohesión y peso específico).

$$q_R = c N_c f_c F_{R1} + p_v N_q f_q F_{R2} + 0.50 \gamma B N_\gamma f_\gamma F_{R3}$$

15

Los valores de F_{Rn} son aquellos que incrementan la capacidad de carga resistente, de ahí que sean mayores a 1.

Factores que influyen en la capacidad de carga:

Es importante mencionar que existen fenómenos que alteran la capacidad de carga del suelo, como los que se comentan a continuación:

- Tipo de suelo.
- Forma de la cimentación.
- Factores de resistencia.
- Elementos mecánicos.

Tipo de suelo:

Clasificar al suelo de acuerdo a sus propiedades índice es muy importante, ya que, no solo son indicadores sobre la teoría a utilizar para el cálculo de capacidad de carga, sino proporciona una idea del tipo comportamiento que puede presentar el suelo. Es valido considerar a las:

- Arcillas como suelos puramente cohesivos.
- Arenas como suelos puramente friccionantes.

Suelos puramente cohesivos, totalmente saturados:

Nos referimos a este tipo de suelo a los suelos que tienen el parámetro $\Phi = 0$, con la condición de S_r cercano 100%. Si el suelo a analizar persiste la condición de totalmente saturado observamos que la condición más desfavorable para la resistencia al corte ocurre cuando ($u_a = u_w$) provocando que el esfuerzo cortante se calcule así:

$$s = c + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad \text{---} \quad \boxed{16}$$

De donde:

- (u_a) = Representa presión el aire.
- c y ϕ = Son los parámetros de cohesión y fricción interna respectivamente.

Tomando esta condición desfavorable nos damos cuenta que la ecuación de la carga resistente queda de la siguiente manera:

$$q_R = c 5.14 f_c F_{R1} + p_v \quad \text{---} \quad \boxed{17}$$

De donde:

- $f_c = 1 + 0.25 \left(\frac{B}{L}\right)$ --- $\boxed{18}$
- $N_c = 2 + \pi = 5.14$ --- $\boxed{21}$
- $f_q = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \tan \phi^o = 1$ --- $\boxed{19}$
- $N_\gamma = \frac{2(N_q+1)}{\tan \phi} = 1$ --- $\boxed{22}$
- $f_\gamma = 1 - 0.4 \left(\frac{B}{L}\right)$ --- $\boxed{20}$
- $N_q = e^{\pi \tan \phi^o} \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi^o}{2}\right) = 1$ --- $\boxed{23}$

Suelos puramente cohesivos, parcialmente saturados:

Los suelos cohesivos presentan valores de 0 en el ángulo de fricción interna. De acuerdo a Fredlund y Rahardjo (1993) proponen la siguiente ecuación para calcular el esfuerzo cortante de la siguiente manera:

$$s = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad \text{---} \quad \boxed{24}$$

De donde:

- $(u_a - u_w)$ = Representa el fenómeno de succión.
- c', ϕ', ϕ^b = Son parámetros que se proponen por Fredlund y Rahardjo.

En estos ciclos de expansión y compresión se presenta un fenómeno de succión(en el momento en que se seca el suelo) aumentando la resistencia al corte, en otras palabras al reducir su grado de saturación se presentará un incremento en la resistencia al corte. Dadas estas condiciones se puede calcular la capacidad de carga resistente de la siguiente manera:

$$q_R = cN_c f_c F_{R1} + p_v N_q f_q F_{R2} + 0.50 \gamma B N_\gamma f_\gamma F_{R3}$$

25

De donde:

- $f_c = 1 + 0.25 \left(\frac{B}{L}\right)$ ————— 18
- $N_c = 2 + \pi = 5.14$ ————— 21
- $f_q = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \tan 0^\circ = 1 ; \phi = 0$ ————— 19
- $N_\gamma = \frac{2(N_q+1)}{\tan 0} = 1$ ————— 22
- $f_\gamma = 1 - 0.4 \left(\frac{B}{L}\right)$ ————— 20
- $N_q = e^{\pi \tan 0^\circ} \tan^2 \left(45^\circ + \frac{0^\circ}{2}\right) = 1$ ————— 23

Debido a que la expulsión de agua es muy lenta en suelos como las arcillas la magnitud de la consolidación primaria del suelo será muy pequeña y por ende, las pruebas enfocadas a este tipo de suelo serán del tipo "No drenadas".

Suelos puramente friccionantes:

Se considera a suelos totalmente friccionantes a limos y arcillas, esto por tener el parámetro $c=0$ y poder calcular el esfuerzo cortante de la siguiente manera:

$$s = \sigma + \tan \phi$$

26

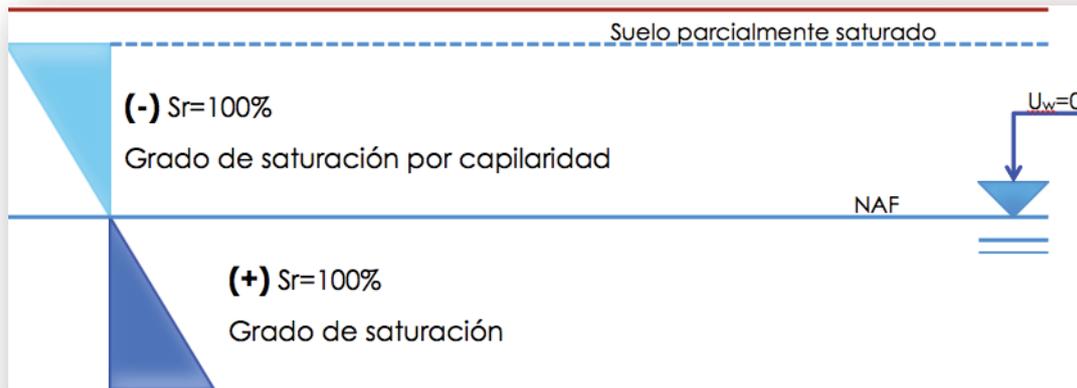
Donde la capacidad de carga resistente, sujeta a suelos donde prevalece la condición de $c=0$:

$$q_R = 0 + p_v N_q f_q F_{R2} + 0.50 \gamma B N_\gamma f_\gamma F_{R3}$$

27

Es posible considerar a los dos factores F_{R2} y F_{R3} de igual valor a F_r . Cabe resaltar que el primer término se reduce a 0 porque el valor de la cohesión se supone ≈ 0

Nivel de agua freática: Otro efecto a considerar en suelos friccionantes es el nivel de agua freática en área en que se presenta la cimentación, esto porque las arenas tienen un coeficiente elevado de permeabilidad ocasionando que se expulse el agua con relativa facilidad, en otras palabras, se consolida prácticamente en cuanto se le aplique una carga externa.



Por lo antes mencionado el cálculo de capacidad de carga para suelos friccionantes, más la capacidad de carga resistente bajo el efecto del agua resulta en la siguiente ecuación:

$$q'_R = p'_V N_q f_q F_{R2} + 0.50 \gamma' B N_\gamma f_\gamma F_{R3} \text{ para la fracción sólida.}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \bullet \gamma' &= \gamma_{\text{suelo saturado}} - \gamma_{\text{agua}} \\ \bullet u_R &= p_v F_{R4} - p'_V F_{R5} \text{ para la fracción líquida.} \end{aligned}$$

Así que la capacidad de carga debida a la presencia de agua a nivel de desplante de la cimentación se calcula de la siguiente manera:

$$q_R = q'_R + u_R \quad ; \quad p_v = p'_V + u$$

$$q_R = p'_V N_q f_q F_{R2} + 0.50 \gamma' B N_\gamma f_\gamma F_{R3} + p_v F_{R4} - p'_V F_{R5}$$

Donde a todos los factores de seguridad se les da un valor igual a 1 y la ecuación que utilizará es la siguiente.

$$q_R = [p'_V (N_q f_q - 1) + 0.50 \gamma' B N_\gamma f_\gamma] F_R + p_v$$

Forma de la cimentación:

El efecto que tiene la forma de la cimentación recae directamente en los valores de N_c , N_q , N_γ , f_c , f_q y f_γ , que a su vez toman valores distintos de acuerdo a la teoría que se utilice para el cálculo mismo de capacidad de carga.

$$q_R = cN_c f_c F_{R1} + p_v N_q f_q F_{R2} + 0.50 \gamma B N_\gamma f_\gamma F_{R3}$$

15

De donde podemos calcular:

$$\bullet f_c = 1 + 0.25 \left(\frac{B}{L} \right)$$

$$\bullet f_q = 1 + \left(\frac{B}{L} \right) \tan \phi$$

$$\bullet f_\gamma = 1 - 0.4 \left(\frac{B}{L} \right)$$

18

19

20

Pruebas de laboratorio:

Las siguientes pruebas de laboratorio nos arrojan parámetros decisivos en la elección de la teoría que se utilizará para calcular la capacidad de carga última del suelo en cuestión.

- Compresión triaxial.
- Corte directo



Para poder conocer, así:
 ϕ , c , D_r , γ_m .

Compresión triaxial:

Se recomienda este tipo de prueba bajo la variación de no consolidada no drenada, esto porque, al tener una fracción significativa de agua en el suelo analizado podemos obtener: una distribución de esfuerzos uniforme, una medición de la magnitud de la presión de poro y medir el cambio de volumen que experimenta el suelo.

En seguida de la compresión triaxial realizamos un análisis por medio de los círculos de Mohr, esto es, a medida en que se incrementa el esfuerzo principal σ_1 se mantiene constante el esfuerzo lateral σ_3 hasta que se llegue al límite y falle el material. Es en este momento en el que se "imprimen" los círculos de Mohr, se encuentra la recta de falla "s" y se obtiene el esfuerzo cortante máximo que soporta el suelo.

¿Cómo se calcula?

La manera de encontrar el esfuerzo máximo de un cierto suelo consiste en tomar en cuenta aspectos geométricos de la cimentación y diversos factores característicos del suelo, tal y como se propone en los siguientes pasos:

1. Se realizan distintas pruebas, para obtener parámetros como: Φ , c , D_r , γ_m ; los cuales nos ayudan a realizar análisis sobre el comportamiento del suelo ante cargas externas con un grado de detalle mayor.
2. Para entender el comportamiento del suelo, bajo el concepto de capacidad de carga, se realiza un análisis con los círculos de Mohr.
3. Conocido el comportamiento, el tipo del suelo y nivel de aguas freáticas, procedemos a calcular factores importantes como:

$$\bullet N_c = \frac{(N_q - 1)}{\tan \phi} \quad \text{---} \quad \boxed{21}$$

$$\bullet N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{---} \quad \boxed{22}$$

$$\bullet N_\gamma = \frac{2(N_q + 1)}{\tan \phi} \quad \text{---} \quad \boxed{23}$$

4. De la misma manera se calculan los factores de forma como:

$$\bullet f_c = 1 + 0.25 \left(\frac{B}{L} \right) \quad \text{---} \quad \boxed{18}$$

$$\bullet f_q = 1 + \left(\frac{B}{L} \right) \tan \phi \quad \text{---} \quad \boxed{19}$$

$$\bullet f_\gamma = 1 - 0.4 \left(\frac{B}{L} \right) \quad \text{---} \quad \boxed{20}$$

5. Un punto adicional a considerar es el factor de resistencia del suelo, estos valores menores a 1 nos ayudan con la incertidumbre que se tiene en el área en la que se realiza este estudio.
6. Teniendo todos estos factores calculados podemos proceder a obtener la capacidad de carga del suelo, para

Suelos puramente cohesivos, totalmente saturados: --- $\boxed{17}$

$$q_R = c 5.14 f_c F_{R1} + p_v$$

Suelos puramente cohesivos, parcialmente saturados: --- $\boxed{15}$

$$q_R = c N_c f_c F_{R1} + p_v N_q f_q F_{R2} + 0.50 \gamma B N_\gamma f_\gamma F_{R3}$$

Suelos puramente friccionantes: --- $\boxed{27}$

$$q_R = p_v N_q f_q F_{R2} + 0.50 \gamma B N_\gamma f_\gamma F_{R3}$$

Diseño Estructural

3



Diseño estructural:.....	33
Diseño de cimentaciones:	33
Factores a considerar en el diseño:.....	33
Tipo de cimentación:.....	33
Combinación de cargas:.....	39
¿Cómo se dimensiona?:	44
Sismo:	44

Diseño estructural:

El diseño estructural define los rasgos característicos de una construcción que cumple con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2004); nos referimos a los atributos que logran hacer la construcción resistente ante cargas vivas, muertas y accidentales.

Diseño de cimentaciones:

El diseño de una cimentación debe ser capaz de no solo soportar todas las cargas que impone la misma estructura, sino el poder adaptarse a las condiciones que impone el suelo que lo rodea.

Factores a considerar en el diseño:

Una cimentación es la encargada de distribuir hacia el terreno todo el conjunto de cargas que le canaliza la super-estructura, por lo que al diseñar y proponer una solución debemos comprobar que nuestra alternativa satisface los criterios particulares de la construcción, por lo que es conveniente revisar los siguientes 3 puntos:

- 🍏 Tipo de cimentación.
- 🍏 Combinación de acciones.
- 🍏 Sismo.

Tipo de cimentación:

El tipo de cimentación va de acuerdo a la medida en que se desea aprovechar las características particulares del suelo en que se esta llevando a cabo la estructura. Las alternativas a tratar en este escrito se desarrollan de la siguiente manera:

- 🍏 Zapatas(cimentaciones someras).
- 🍏 Losas(cimentaciones someras).

Zapatas:

Esta forma de cimentación consiste en el ensanchamiento de vigas o columnas que llegan hasta el nivel de piso, éstas distribuyen todas las cargas producidas por la estructura completa hasta el suelo.

Existen dos tipos de zapatas: Aisladas (éstas aumentan el área de las columnas para distribuir mejor los esfuerzos) y continuas (éstas

presentan un crecimiento en área de traves para distribuir mejor los esfuerzos).



Zapata Aislada 1

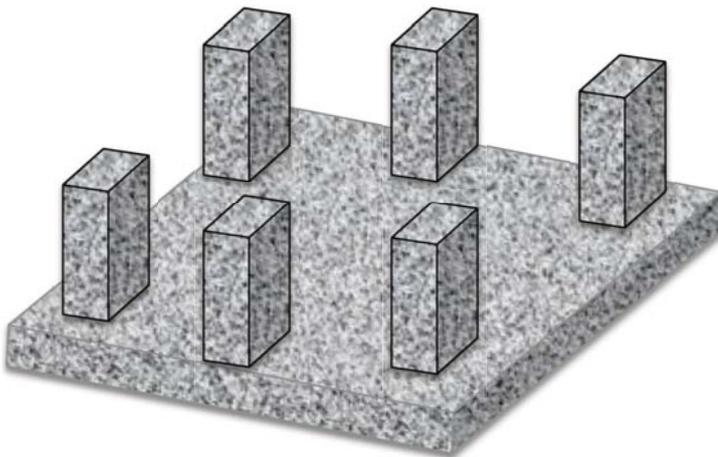


Zapata Corrida 1

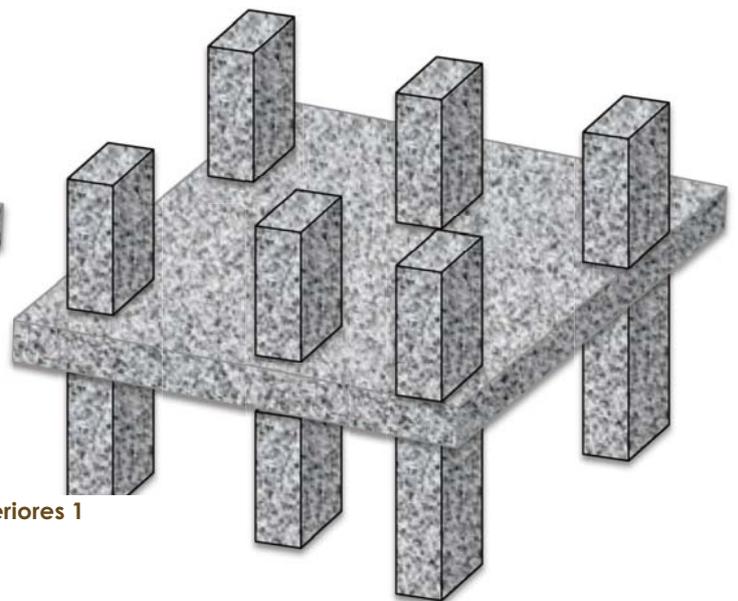
Losas:

Las losas de cimentación son consideradas como cimentaciones someras, esto porque cubre toda el área bajo la estructura.

Existen variaciones como: Losas planas (las columnas recaen directamente o por medio de un cierto peralte sobre la losa tal y como se muestra en la siguiente figura "losas planas 1"), Losas con contratrabes (se recomienda su uso cuando se presentan grandes cargas y claros) y losas con contratrabes inferiores tal y como se muestra en la figura "losas inferiores 1" (por lo general se utilizan con junto con otro tipo de cimentación llamado "cajón de cimentación" para aprovechar al máximo el diseño).



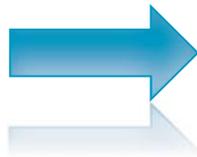
Losas planas 1



Losas Inferiores 1

La elección ambas formas de cimentación tienen como objetivo impedir que el suelo llegue a sus estado limite de falla, por lo que se debe asegurar que la cimentación (zapata aislada, corrida o losa) soporte los siguientes elementos mecánicos y evite sus correspondientes fallas tales como:

- 🍏 Cortante
- 🍏 Momento
- 🍏 Punzonamiento
- 🍏 Temperatura



Falla por tensión diagonal (grietas).
 Falla por flexión (grietas).
 Falla por punzonamiento (perforación).

Cortante:

De manera similar a una viga de concreto se pueden presentar grietas diagonales (tensión diagonal) por fuerzas cortantes. Siguiendo los lineamientos proporcionados por el reglamento de construcción del Distrito Federal se debe revisar el efecto de fuerza cortante resistente con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } p < 0.01 \quad V_{cR} = F_R b d (0.2 + 30p) \sqrt{f_c^*}$$

$$\text{Si } p \geq 0.01 \quad V_{cR} = F_R b d \sqrt{f_c^*}$$

De donde observamos que:

p = a la cantidad de acero utilizado.

b = ancho del elemento.

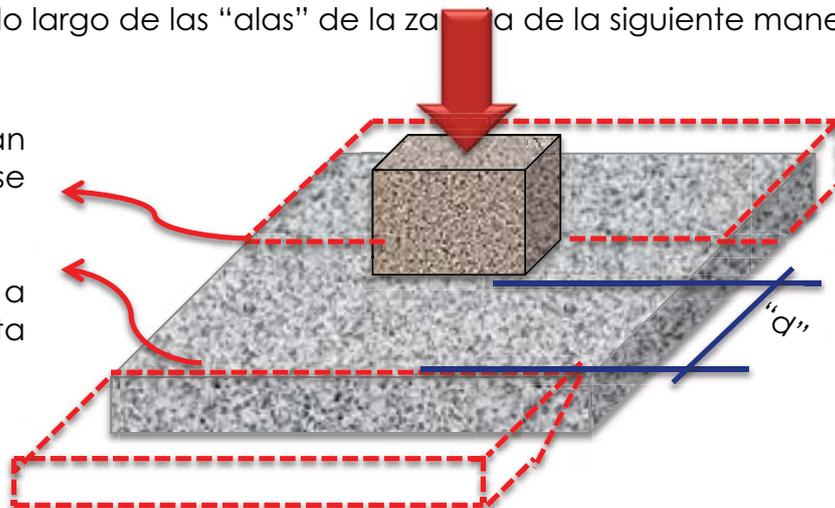
d = peralte efectivo del elemento.

$$f_c^* = 0.8 f'_c$$

F_R = Factor de resistencia.

La falla por cortante consiste en grietas diagonales de tensión que se presentan a lo largo de las "alas" de la zapata de la siguiente manera.

Se presentan diagonales y se desprenden estas secciones a una cierta distancia "d"



Flexión:

Al presentarse el fenómeno de flexión se producen agrietamientos en las "alas" de la zapata. La distancia en que este agrietamiento sucede depende del material de que este hecha la columna o muro de la zapata.

Encontrar la sección crítica es de suma importancia, ya que, nos permite reforzar ciertas sección de la cimentación; se hace uso del Reglamento de Construcciones del D.F (2004) para poder revisar a una cimentación bajo el concepto de momento resistente.

$$M_R = F_R b d^2 f_c'' q (1 - 0.5q)$$

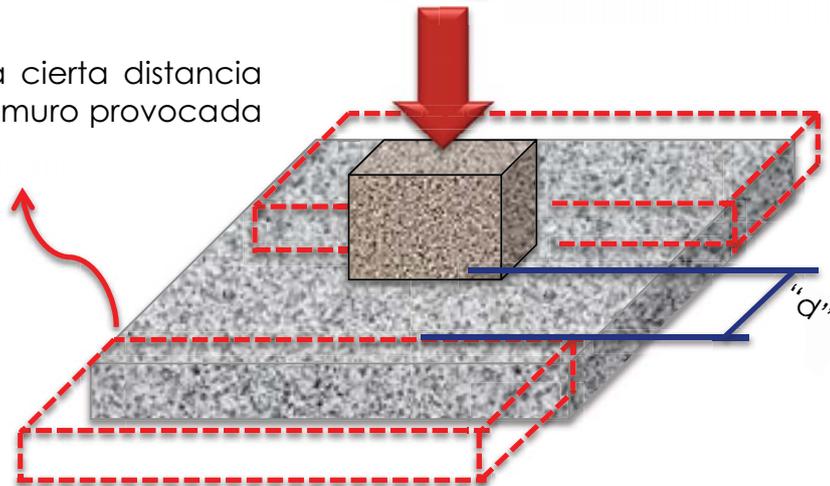
$$q = \frac{p f_y}{f_c''}$$

Donde se sabe que la cantidad de acero para flexión es:

$$p_{\text{mínima}} = 0.7 \frac{\sqrt{f_c'}}{f_y} \quad p_{b(\text{optima})} = \frac{f_c''}{f_y} \left[\frac{4800}{(f_y + 6000)} \right]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_c'' = 0.85 f_c^* \text{ para } f_c^* \leq 250 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] \\ f_c'' = \left(1.05 - \frac{f_c^*}{250} \right) \text{ para } f_c^* > 250 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] \end{array} \right.$$

Se agrieta a una cierta distancia de la columna o muro provocada por el momento



Para conocer la cantidad de acero necesaria para resistir el momento último se realiza utilizando la siguiente ecuación.

$$M_U = F_R b d^2 f_c'' q (1 - 0.5q)$$

De donde despejamos "q".

$$q = 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * M_U}{F_R b d^2 f_c''}}$$

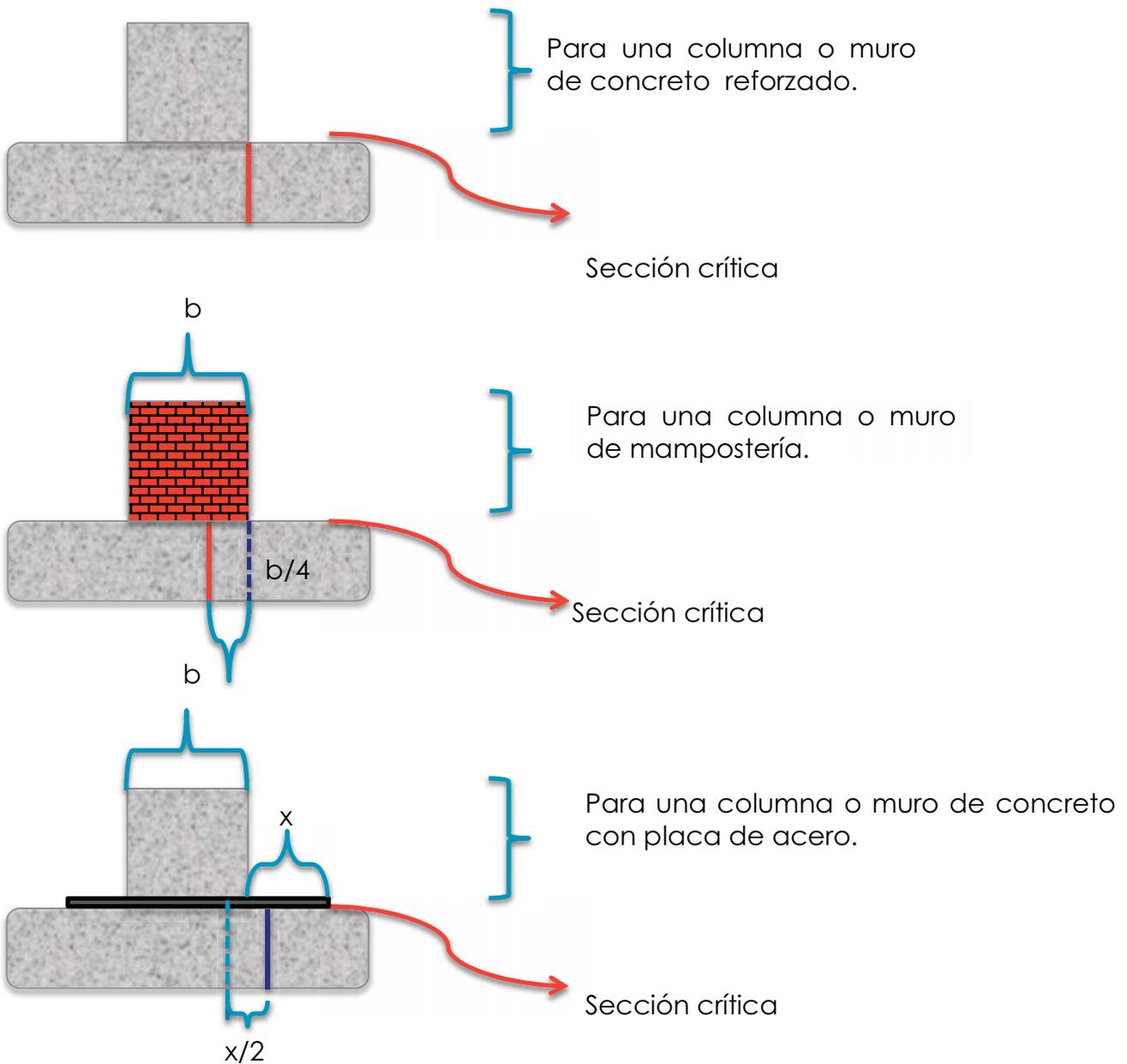
Teniendo estos datos podemos aplicar la siguiente ecuación y encontrar el área de acero requerida en la cimentación.

$$p = q \frac{f'_c}{f_y}$$



$$A_s = pbq$$

Las distancias en donde se presenta la sección crítica para el fenómeno de flexión son las siguientes:



Penetración:

Este fenómeno también conocido como punzonamiento se hace presente en las alas de la zapata; se da en el momento en que la columna “perforar” la cimentación y hundirse. Para evitar que este fenómeno suceda es necesario revisar la cimentación considerando el siguiente proceso:

1. Al generarse un momento, este transmite parte una fracción de el hacia una “ala” de la cimentación y se calcula de la siguiente manera:

$$\alpha = 1 - \frac{1}{1 + 0.67 \sqrt{\frac{c_1 + d}{c_2 + d}}}$$

2. Debido a que la transmisión se debe a la excentricidad de la fuerza cortante total se debe tomar en cuenta la magnitud del cortante máximo.

$$V_{AB} = \frac{V}{A_c} + \frac{\alpha M c_{AB}}{J_c}$$

Donde podemos calcular sus elementos siguientes:

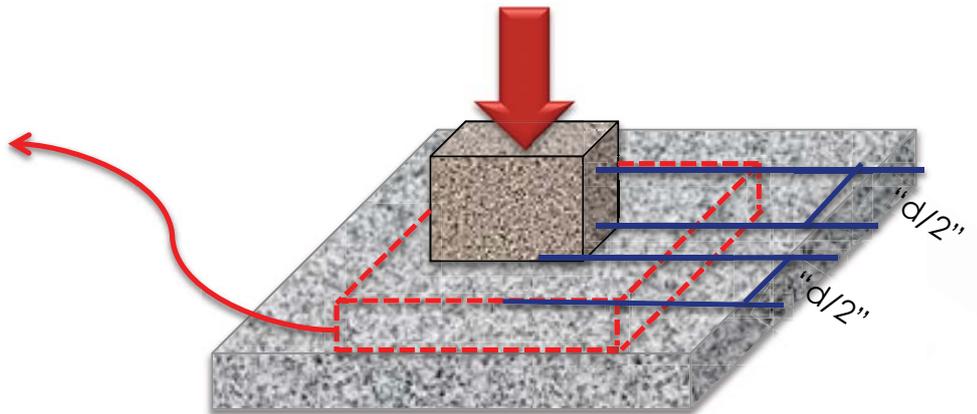
$$A_c = 2d(c_1 + c_2 + 2d)$$
$$J_c = \frac{d(c_1 + d)^3}{6} + \frac{(c_1 + d)d^3}{6} + \frac{d(c_2 + d)(c_1 + d)^2}{2}$$

3. Debemos asegurarnos de que el cortante generado no sobrepase los siguientes valores:

$$V_{CR1} = F_R(0.5 + \gamma)\sqrt{f_c^*}$$
$$V_{CR2} = F_R\sqrt{f_c^*}$$

Recordando que la probabilidad de que el concreto utilizado no cumpla con las especificaciones de diseño es del 2%, por lo que se debe considerar: $f_c^* = 0.8f_c'$

La falla por punzonamiento consiste en que la columna perfora el área marcada con rojo en la zapata de concreto.



Debe hacerse notar que para el caso de una zapata corrida no se revisa bajo este concepto de penetración, si no que debemos enfocarnos a dimensionar la contratrabe.

Temperatura:

El acero se encuentra inmerso en el concreto con la finalidad de soportar los efectos de tensión, sin embargo bajo el concepto de acero por temperatura el acero utilizado no funciona para soportar el efecto de tensión, si no mantener en lugar el concreto. Tomando esta información encontramos que:

Acero requerido por concepto de temperatura

$$A_s = \frac{66000 \left(\frac{h}{2}\right)}{f_y \left(\frac{h}{2} + 100\right)}$$

Acero requerido por concepto de temperatura y en contacto con el suelo

$$A_s = \frac{99000 \left(\frac{h}{2}\right)}{f_y \left(\frac{h}{2} + 100\right)}$$

Donde:

$\frac{h}{2}$ = Es el semi espesor de la losa de la zapata.

f_y = Calidad del acero.

Combinación de cargas:

Independientemente del tipo de cimentación elegido es necesario realizar un análisis de combinación de cargas, ya que nos permite tener una amplia gama de todos los posibles escenarios que tendrá la construcción.

El Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, por medio de una función de distribución de probabilidades, establece tres

combinaciones en donde el dimensionamiento de los elementos de la estructura se hacen bajo las condiciones más adversas.

Combinaciones	
Primera	Segunda
Carga muerta + Carga viva máxima	Carga muerta + Carga viva+ Carga accidental
Estados Límites de falla (capacidad de carga)	

Sismo:

La ciudad de México se encuentra en una zona de lago, lo cual hace que se amplifiquen las ondas sísmicas provenientes de la placa de cocos(situada cercana al estado de Guerrero); es por esta razón que el factor que rige el diseño de cimentaciones es el sísmico.

Para poder dimensionar y revisar la cimentación bajo el concepto de sismo es necesario tomar en cuenta dos puntos importantes:

- 🍏 Dirección del sismo.
- 🍏 Coeficiente sísmico.

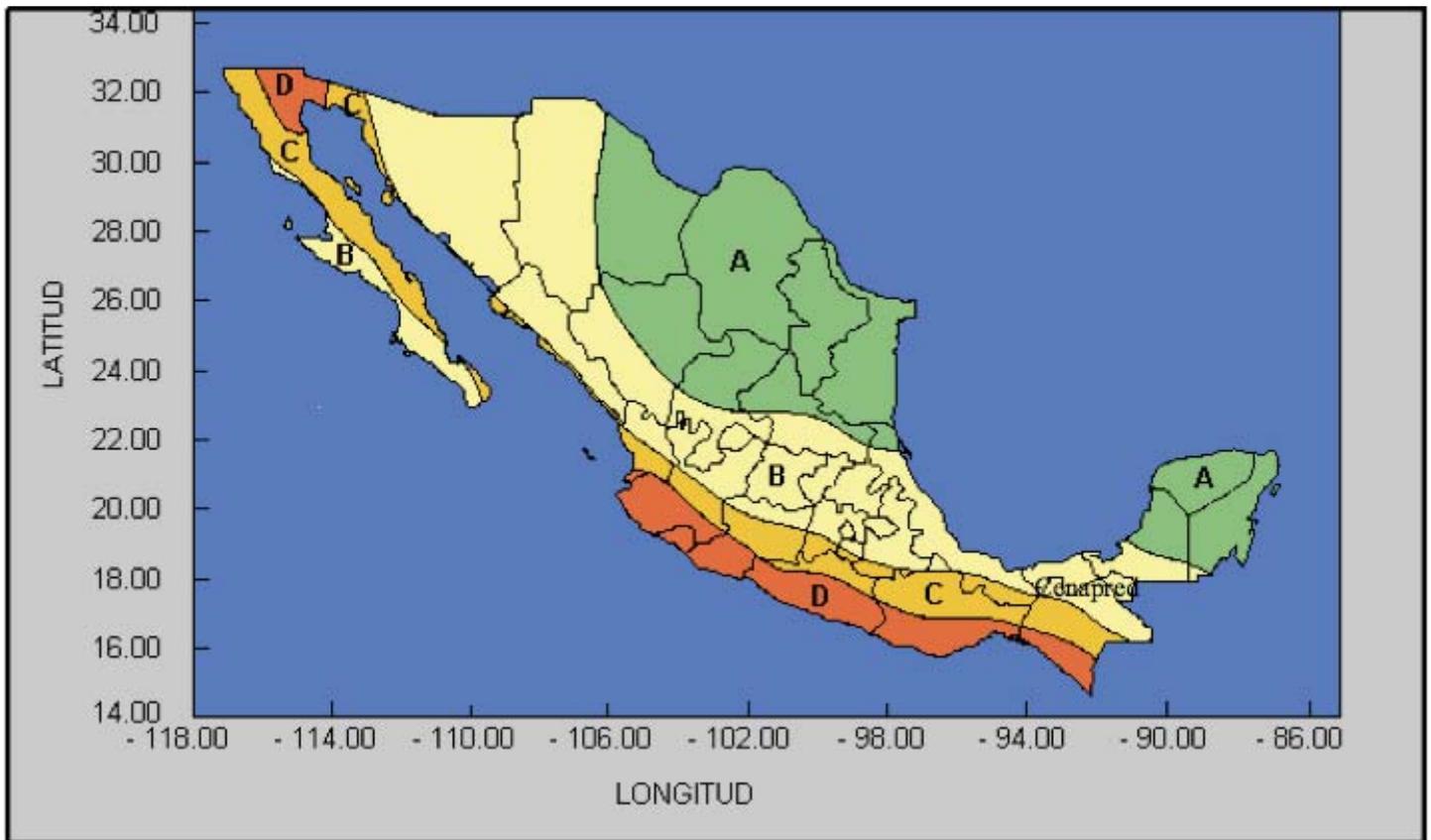
Dirección del sismo:

Al desconocerse el epicentro de un sismo, por consiguiente se ignora el punto en que las ondas chocan con la estructura. Es por esta razón que se toma en cuenta que la acción de las componentes horizontales ortogonales al movimiento del terreno llega en dos direcciones en X($S_x=100\%$, $S_y=30\%$) y en Y($S_x=30\%$, $S_y=100\%$)

Coeficiente sísmico.

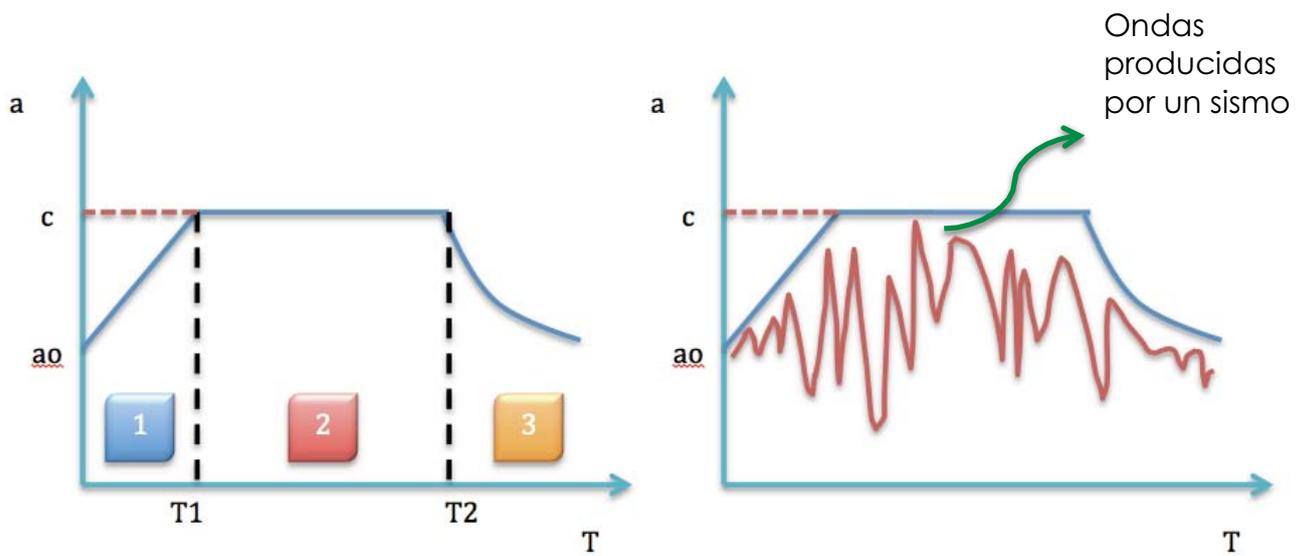
El coeficiente sísmico es un valor que permite: graficar el espectro de diseño(en base al tipo de suelo, importancia de la edificación y al peligro sísmico de la zona) y calcular los elementos mecánicos de cortante y momento necesarios para el diseño de la cimentación.

Para poder crear una estructura bajo el coeficiente sísmico es necesario entender que existe una regionalización que nos permite clasificar toda la República Mexicana en distintas áreas de acuerdo a su peligro sísmico, de acuerdo al Comisión Federal de Electricidad (CFE) encontramos que los Estados Unidos Mexicanos se encuentra dividido en cuatro zonas (A, B, C y D) tal y como se muestra a continuación.



Además de la regionalización también tenemos que tomar en cuenta el tipo de suelo (I, II, y III), en especial las arcillas de la Ciudad de México ya que éstas producen una amplificación de las ondas con periodos largos y por consiguiente entran en **resonancia** con estructuras con periodos de onda largos como los edificios o en su contraparte en roca volcánica prevalecen las ondas cortas y por consiguiente las edificaciones como casas habitación presentan vibraciones cortas.

Es por esta razón que para el diseño de estructuras el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal propone calcular un coeficiente sísmico "c" base al peligro sísmico y tipo de suelo. Se muestra a continuación la manera en que el espectro de diseño "envuelve" todas las ondas que se producen en un sismo.



De donde encontramos que:
 a: La aceleración se encuentra en el eje de las ordenadas.
 T: Periodo (en segundos) se encuentra en el eje de las abscisas.
 c: Coeficiente sísmico.



$$0 < T < T_1; a = a_0 + \frac{c - a_0}{T_1} T$$



$$T_1 \leq T \leq T_2; a = c$$



$$T > T_2; a = c \left(\frac{T_2}{T} \right)^r$$

Zona sísmica	Tipo de suelo	a0 [1]	c [1]	T1 [s]	T2 [s]	r [1]
A	I	0.02	0.08	0.20	0.60	0.50
	II	0.04	0.16	0.30	1.50	0.67
	III	0.05	0.20	0.60	2.50	1.00
B	I	0.04	0.14	0.20	0.60	0.50
	II	0.08	0.30	0.30	1.50	0.67
	III	0.10	0.36	0.60	2.90	1.00
C	I	0.36	0.36	0.00	0.60	0.50
	II	0.64	0.64	0.00	1.40	0.67
	III	0.64	0.64	0.00	1.90	1.00
D	I	0.50	0.50	0.00	0.60	0.50
	II	0.86	0.86	0.00	1.20	0.67
	III	0.86	0.86	0.00	1.70	1.00

Obteniendo el coeficiente sísmico podemos utilizarlo para multiplicarlo para poder encontrar elementos mecánicos ante sismo como el cortante y el momento.

$$c * V = V(\text{cortante producido por un sismo}); \quad c * M = M(\text{Momento sísmico})$$

Al tener listos dos elementos mecánicos procedemos a encontrar los esfuerzos que éstos ocasionan en cada esquina de la cimentación siguiendo estos 3 pasos:

1. Se utilizará la siguiente ecuación:

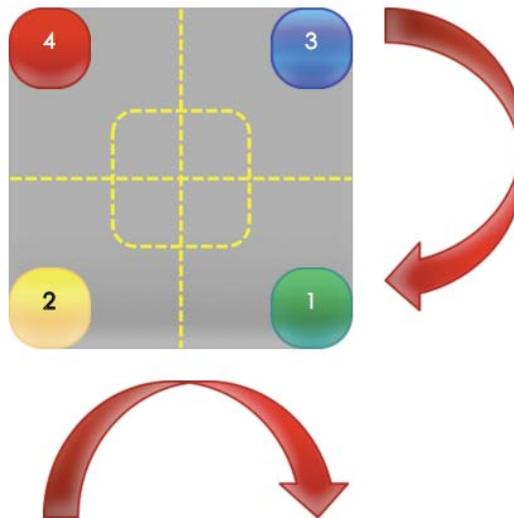
$$q = q_0 \pm \frac{M_T L}{I_L} \pm \frac{M_L I}{I_T}$$

Donde se utilizará:

$$I_T = \frac{bh^3}{12} [L^4]$$

$$I_L = \frac{hb^3}{12} [L^4]$$

$$q_0 = \frac{\Sigma Q}{\text{Area zapata}} [ML^{-2}]$$



q_0 = Carga producida por la combinación de cargas 2 entre el área de la zapata [t/m²].
 I_T = Inercia respecto al lado transversal.
 I_L = Inercia respecto al lado longitudinal.
 L = Distancia longitudinal.
 T = Distancia transversal.

Carga canalizada a cada esquina de la cimentación	
$q_4 = q_0 + \frac{M_T L}{I_L} - \frac{M_L I}{I_T}$	$q_3 = q_0 - \frac{M_T L}{I_L} - \frac{M_L I}{I_T}$
$q_2 = q_0 - \frac{M_T L}{I_L} + \frac{M_L I}{I_T}$	$q_1 = q_0 + \frac{M_T L}{I_L} + \frac{M_L I}{I_T}$

2. Al obtener los esfuerzos en cada esquina se obtiene el área de la zapata corregida y se vuelven a utilizar las ecuaciones anteriores.

$$A' = \left(\frac{B + b}{2} \right) H [L^2] = \text{Area zapata corregida}$$

$$q'_0 = \frac{\Sigma Q}{\text{Area zapata corregida}} [ML^{-2}]$$

Carga canalizada a cada esquina de la cimentación	
$q_4 = q'_0 + \frac{M_T L}{I_L} - \frac{M_L I}{I_T}$	$q_3 = q'_0 - \frac{M_T L}{I_L} - \frac{M_L I}{I_T}$
$q_2 = q'_0 - \frac{M_T L}{I_L} + \frac{M_L I}{I_T}$	$q_1 = q'_0 + \frac{M_T L}{I_L} + \frac{M_L I}{I_T}$

3. Tomar el mayor esfuerzo (valor absoluto) de las cuatro esquinas de la zapata y verificar si las dimensiones propuestas pasan en base al factor de seguridad adecuado.

$$F_s = \left(\frac{\text{Factor de seguridad real}}{\text{Factor de seguridad actuante}} \right)$$

Al elegir un tipo de cimentación de acuerdo a las características propias del suelo a cargas externas, combinación de cargas y el efecto de un sismo podemos obtener una cimentación que no solo cumpla con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal si no que brinda confort y seguridad a los usuarios de esa edificación.

¿Cómo se dimensiona?:

Al dimensionar una cimentación (independientemente del tipo que se elija) podemos utilizar el siguiente procedimiento que cumpla con los requisitos del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal:

1. Elegir un tipo de cimentaciones (zapatas aisladas, zapatas corridas).
2. Se toma en cuenta el área tributaria que carga cada punto de la cimentación deseada(el programa acepta hasta 4 áreas tributarias distintas).
3. Por medio de la combinación carga muerta + carga viva máx se encuentra un área teórica de cimentación y se parte de esa magnitud para los siguientes cálculos.

Sismo:

1. Al tomar en cuenta el efectos sísmico para el diseño se consideran los siguientes aspectos: Una combinación de cargas (carga muerta+ carga viva reducida), un valor de Q (dependiendo de la forma de la super-estructura)y un coeficiente sísmico Cs(dependiente del tipo de suelo en que se encuentre la estructura)para poder calcular el cortante y los momentos sísmicos.
2. Para completar el análisis se considera que el sismo llega en dos direcciones en X(Sx=100%, Sy=30%) y en Y(Sx=30%, Sy=100%).

Cada punto se encuentra sustentado con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal del 2004, utilizando el programa en Excel y siguiendo los puntos del reglamento obtendremos un diseño que satisfaga las necesidades de la edificación con excelentes resultados.

Análisis y diseño de una cimentación superficial de una estructura

4



Análisis y diseño de una cimentación:	46
Conclusión:	59

Análisis y diseño de una cimentación:

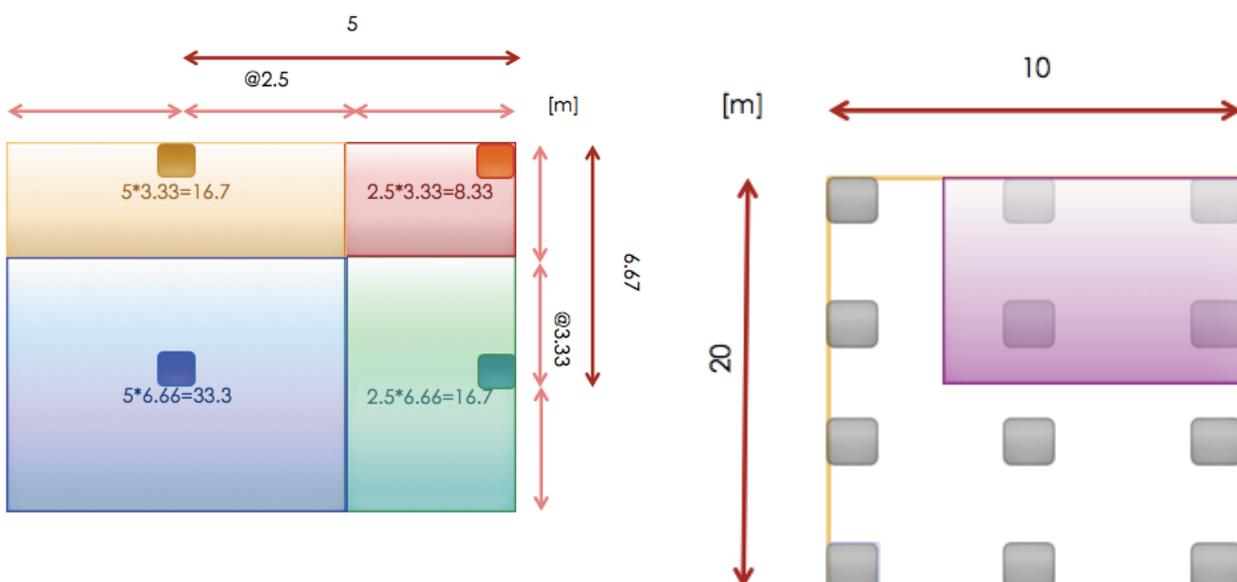
Diseño estructural

El programa de Excel CimDeCa tiene como objetivo hacer un análisis y diseño para cimentaciones superficiales. Este análisis lo realiza haciendo uso de las ecuaciones previamente descritas sobre el comportamiento de una masa de suelo, toma en cuenta nivel freático del agua y parámetros característicos del suelo (ángulo de fricción interna ϕ , Cohesión c y Módulo de deformación Me), muestra el procedimiento sobre cómo se obtuvo el resultado y recomendaciones sobre la manera en que se puede optimizar el diseño.

Se anexa el programa en Excel y se muestra su uso a través de un ejemplo, ya que existen alternativas de cimentaciones superficiales para una estructura, tales como:

1. Se plantea una zapata aislada: Deformaciones y Capacidad de carga.
2. Se plantea una zapata corrida: Deformaciones y Capacidad de carga.
3. Se plantea una losa: Deformaciones y Capacidad de carga.

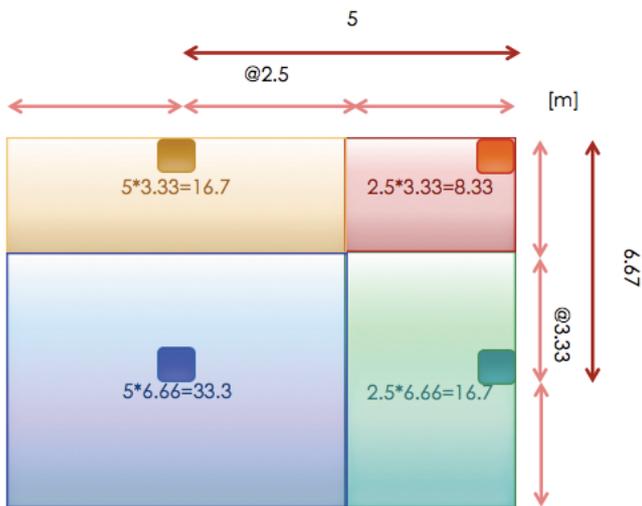
Utilizando el programa CimDeCa comenzaremos a analizar un edificio de 2 pisos construido sobre un terreno de 200 m². Al presentarse la siguiente distribución de columnas encontramos que en la esquina superior derecha tenemos la presencia de cuatro distintas áreas tributarias, las cuales se repiten a lo largo y ancho del terreno.



Debido a que es una casa habitación obtenemos la siguiente asignación de carga: muerta, viva y viva máx.

Carga del tipo

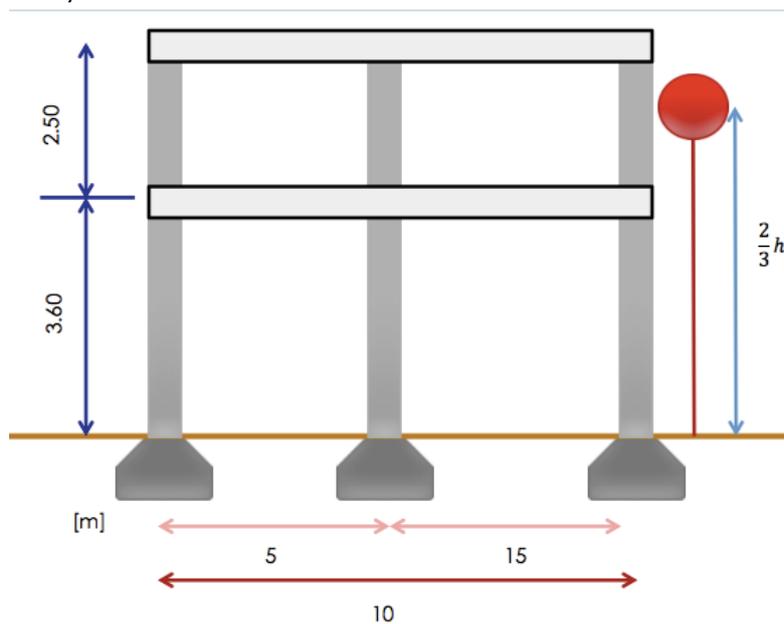
Nivel	Carga Muerta	Carga Viva	Carga Viva máx
[No.]	[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]
Piso #	800	250	180
Azotea	650	100	60



Cargas sobre la cimentación

Áreas tributarias [m ²]	Sección [No.]
$5 \times 3.33 = 16.7$	Am1
$2.5 \times 3.33 = 8.33$	Ro1
$5 \times 6.66 = 33.3$	Az1
$2.5 \times 6.66 = 16.7$	Ve1

El edificio tiene una altura 6.10 metros, cuenta con las siguientes dimensiones y características:



Ahora, el problema recae en el que aun no conocemos la dimensión de la cimentación, por lo que se siguen los siguientes pasos:

1. Abrir el programa de Excel "CimDeCa".
2. Selección opción "zapata aislada".



11		Cimentación superficial	
12		del tipo	Zapata aislada
13		Area del terreno [m ²]	200
14			

3. Se dan las dimensiones para poder calcular el área:

17	[metros]				
18			10		
19		■		■	
20					
21					
22		■		■	
23					
24	6.66666666666667 @				20
25		■		■	
26					
27					
28		■		■	
29					
30			10		

4. Se coloca el tiempo de análisis para la consolidación primaria (98 días) y para la consolidación secundaria (1 año).

17	El análisis de consolidación Primaria se desea		
18	realizar para el tiempo	[días]	2
19	El análisis de consolidación Secundaria se desea		
20	realizar para el tiempo	[años]	1

17	El análisis de consolidación Primaria se desea		
18	realizar para el tiempo	102	[días]
19	El análisis de consolidación Secundaria se desea		
20	realizar para el tiempo	1	[años]

5. Se calculan introducen los datos sobre carga muerta, viva máxima, viva reducida, áreas tributarias y número de pisos

23	Concepto	C.M.	C.V.máx	C.V.red
24		[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]
25				
26	Entrepiso			
27	Azotea			

23	Concepto	C.M.	C.V.máx	C.V.red
24		[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]
25				
26	Entrepiso	800	250	180
27	Azotea	650	100	60

6. Se le asigna un nombre a las distintas áreas tributarias, se calculan automáticamente las magnitudes de las cuatro respectivas áreas y se introduce el número de pisos del edificio.

31	Cargas sobre la cimentación		
32	Columna	Área tributaria	
33			[m ²]
34			[m ²]
35			[m ²]
36			[m ²]
37	Numero de pisos		

46	Cargas sobre la cimentación		
47	Columna	Área tributaria	
48	Am-1	16.7	[m ²]
49	Ro-1	8.33	[m ²]
50	Az-1	33.3	[m ²]
51	Ve-1	16.7	[m ²]
52	Numero de pisos		1

7. Introducir los datos de las características del suelo, si no se tienen algunos datos simplemente se introduce "0".

Estrato inmediato a la cimentación		
Para zapatas aisladas	unidades	
Dr		[%]
ϕ^*		[°]
γ suelo		[t/m ³]
γ saturada		[t/m ³]
C		[t/m ³]

Estrato inmediato a la cimentación		
Para zapatas aisladas	unidades	
Dr	0%	[%]
ϕ^*	0.00	[°]
γ suelo	1.36	[t/m ³]
γ saturada	1.700	[t/m ³]
C	2.50	[t/m ³]

8. Introduciendo un nivel de aguas freáticas de :

Nivel de agua freático		
NAF	0.3	[m]
γ agua	1	[t/m ³]

9. Se introducen los datos correspondientes a los factores de seguridad.

48	Incertifumbre en las Cargas		
49	Fc1	1.40	[1]
50	Fc2	1.40	[1]
51	Fc3	1.10	[1]

55	Incertifumbre en la Resistencia		
56	Fr1	0.70	[1]
57	Fr2	0.70	[1]
58	Fr3	0.70	[1]
59	Fr4	0.70	[1]
60	Fr5	0.70	[1]

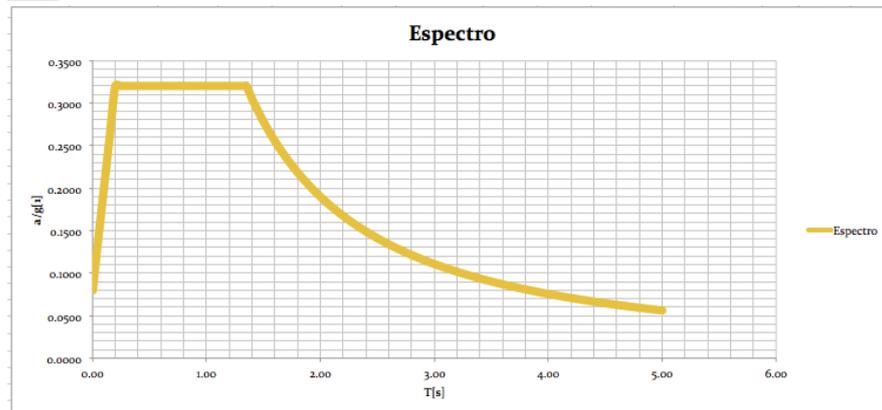
10. Se comienza a introducir datos como, la zona en donde se construirá la estructura, la altura del edificio, calidad del acero y aceleración para poder realizar un análisis sísmico.

para Zona B I								
2h/3	4.07	[m]						

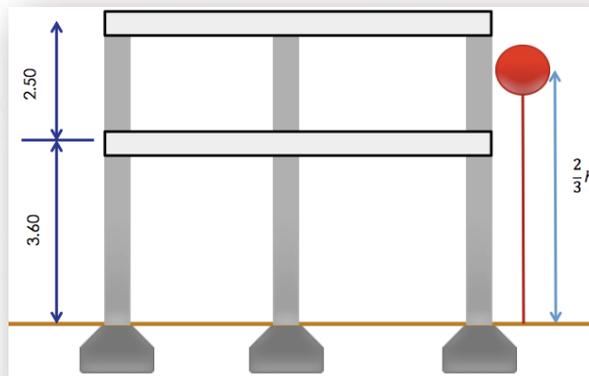
66	Sismo						
67	Q						
68	Altura edif.[m]						
69	fy[kg/m2]						
70	Zona sísmica de la República Mexicana	Tipo de suelo	Cs	ao	Ta	Tb	r
71							
72	-	-	0.3	0.1	0.85	4.2	2

Ver el apéndice respecto al valor de Q

66	Sismo						
67	Q	2.00					
68	Altura edif.[m]	6.10					
69	fy[kg/m2]	4200					
70	Zona sísmica de la República Mexicana	Tipo de suelo	Cs	ao	Ta	Tb	r
71							
72	B	I	0.28	0.08	0.2	1.35	1



Se observa la manera en que se calcula el siguiente dato: $\left(\frac{2}{3}h\right)$

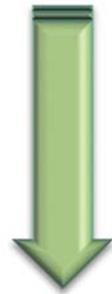


11. Se observa, a través de las combinaciones de cargas, la manera en que se distribuyen las cargas de la estructura de manera automática.

Combinaciones de cargas																		
Fuerzas Estáticas										Fuerza Sísmica								
Columna	Entepiso (ton/m ²)				Pisos	Azotea (ton/m ²)			Σ [ton]	Columna	Entepiso (ton/m ²)				Σ [ton]			
	C.M.	C.Vmáx	Área			C.M.	C.Vmáx	Área			C.M.	C.Vreducida	Área	Pisos				
Am-1	0.800	0.250	16.667		1	0.650	0.100	16.667	30.00	Am-1	0.800	0.180	16.7	1	0.650	0.060	16.7	28.17
Ro-1	0.800	0.250	8.3333		1	0.650	0.100	8.3333	15.00	Ro-1	0.800	0.180	8.33	1	0.650	0.060	8.33	14.08
Az-1	0.800	0.250	33.333		1	0.650	0.100	33.333	60.00	Az-1	0.800	0.180	33.3	1	0.650	0.060	33.3	56.33
Ve-1	0.800	0.250	16.667		1	0.650	0.100	16.667	30.00	Ve-1	0.800	0.180	16.7	1	0.650	0.060	16.7	28.17



Fuerzas Estáticas									
Columna	Entepiso (ton/m ²)				Pisos	Azotea (ton/m ²)			Σ [ton]
	C.M.	C.Vmáx	Área			C.M.	C.Vmáx	Área	
Am-1	0.800	0.250	16.667		1	0.650	0.100	16.667	30.00
Ro-1	0.800	0.250	8.3333		1	0.650	0.100	8.3333	15.00
Az-1	0.800	0.250	33.333		1	0.650	0.100	33.333	60.00
Ve-1	0.800	0.250	16.667		1	0.650	0.100	16.667	30.00

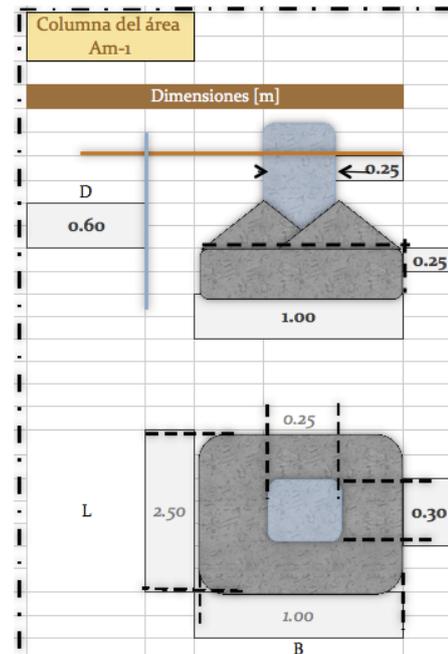


Fuerza Sísmica									
Columna	Entepiso (ton/m ²)				Pisos	Azotea (ton/m ²)			Σ [ton]
	C.M.	C.Vreducida	Área			C.M.	C.Vreducida	Área	
Am-1	0.800	0.180	16.7		1	0.650	0.060	16.7	28.17
Ro-1	0.800	0.180	8.33		1	0.650	0.060	8.33	14.08
Az-1	0.800	0.180	33.3		1	0.650	0.060	33.3	56.33
Ve-1	0.800	0.180	16.7		1	0.650	0.060	16.7	28.17

12. Se llenan los datos de las dimensiones de la cimentación a través de la tabla. Se propone comenzar con una dimensión de 25 cm (se propone un ancho menor a la de la columna que soporta inmediatamente), la profundidad de desplante y se observa se acota de manera automática los siguientes diagramas.

Datos propuestos		
Columna	Am-1	unidades
ΣQ	30.00	[ton]
B(ancho)	2.50	[m]
L(largo)	3.50	[m]
Espesor	0.25	[m]
Desplante(D)	2.00	[m]
γ_{concreto}	2.40	[t/m ³]
Dado(ancho)	0.25	[m]
Dado(largo)	0.30	[m]
FR	3.00	[zapatas]
γ_{Relleno}	1.700	[t/m ³]

10



*La columna esta marcada en color azul, solo para poder diferenciar la columna del "cuerpo" de la zapata.

13. Bajo las condiciones actuales podemos utilizar la ecuación no. 15, y para los factores de forma podemos utilizar las ecuaciones 2,3,4 y 8,9 y 10 para obtener los siguientes resultados inmediatos.

*Debido a que se trata de un suelo puramente cohesivo, algunas celdas producen error, pero en el cálculo se asume un valor de "0".

Parámetros	
α	0.67
ϕ	0 [°]
N_q	1.000000
N_γ	0.000000
N_c	5.141593
f_q	1.000000
f_γ	0.714286
f_c	1.048148
h	1.767767
p_γ	1.020000
γ'	1.700000
$p\gamma'$	1.020000

* se sustituye de manera automática.

Zona de falla bajo el cimiento	
h	$= \frac{B \cos \phi \exp(((\pi/4) + (\phi/2)) \tan \phi)}{2 * \cos((\pi/4) + (\phi/2))} = [m]$
h	$= \frac{2.50 * 1.00 * 1}{2 * 0.70710678} = 1.768 [m]$

14. Bajo los resultados obtenidos con las ecuaciones correspondientes, podemos observar el siguiente proceso y su resultado.

*Se observa que para la suma de cargas se consideran las unidades a cada metro, esto porque estamos considerando a la cimentación como zapata corrida.

15. Se introducen los factores de incertidumbre para las cargas en el siguiente orden F_{c1} , F_{c2} y F_{c3} para sus respectivos parámetros cohesión c , ángulo de fricción interna ϕ y peso específico γ . Obteniendo así la capacidad de carga última.

Incertifumbre en las Cargas			$\Sigma QFc+qcimentación$						
F_{c1}	1.40	[i]	ΣQFc_1	+	Dado F_{c1}	+	Zapata F_{c2}	+	Relleno F_{c2}
F_{c2}	1.40	[i]	1.4		0.294		0.84		0.490875
F_{c3}	1.10	[i]	$\Sigma QFc+qcimentación$			=	3.024875	[ton/m]	

$$q_u = \frac{\Sigma QFc+qcim}{Area} \quad q_u = \frac{3.02}{1.00} = 3.025 \text{ [ton/m}^2\text{]}$$

q_{Ultima} [ton/m ²]	≤	$q_{REsistente}$ [ton/m ²]
3.0249		12.7106

*La capacidad de carga última se define como el esfuerzo transmitido a la masa de suelo.

16. Por último se sustituye y calcula de manera automática la capacidad de resistente.

Incertifumbre en la Resistencia		
F_{r1}	0.70	[i]
F_{r2}	0.70	[i]
F_{r3}	0.70	[i]
F_{r4}	0.70	[i]
F_{r5}	0.70	[i]

*La magnitud del esfuerzo cortante que un suelo puede resistir, antes de fallar, se le conoce como capacidad de carga resistente.

$$q_{Resistente} = \left[\frac{c}{2.50} + \frac{N_c}{5.14} \cdot \frac{fc}{1.3} \cdot \frac{Fr_1}{0.70} \right] + \left[\frac{p_v}{0.420} + \frac{N_q}{1} + \frac{f_q}{0} \cdot \frac{Fr_2}{0.70} \right] + \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma}{0.70} \cdot \frac{B}{1} + \frac{N_\gamma}{0} + \frac{f_\gamma}{0} \cdot \frac{Fr_3}{0.70} \right] + \left[\frac{p_v}{1.02} \cdot \frac{Fr_4}{0.70} \right] - \left[\frac{p_v'}{0.42} \cdot \frac{Fr_5}{0.70} \right] =$$

$$q_{REsistente} = 12.710596 \text{ [ton/m}^2\text{]}$$

17. Automáticamente nos indica, bajo las características previamente descritas, con un botón verde si es la carga resistente es mayor a la carga última, naranja si es igual a la carga última o rojo en caso de ser menor a la carga última.

18. Se aprecian los cálculos de las 2 combinaciones necesarios para los análisis siguientes.

Elementos Mecánicos debidos al sismo													
Fuerza Sísmica													
Columna	Entepiso (ton/m ²)				+	Azotea (ton/m ²)			Σ [ton]	Coeficiente CS	V cortante [t]	Momento sísmico [t-m]	Columna
	C.M.	C.V.reducida	Área	Pisos		C.M.	C.V.reducida	Área					
Am-1	0.800	0.180	16.6666667	1	0.650	0.060	16.6666667	28.17	0.60	16.90	34.36	Am-1	
Ro-1	0.800	0.180	8.33333333	1	0.650	0.060	8.33333333	14.08	0.60	8.45	17.18	Ro-1	
Az-1	0.800	0.180	33.3333333	1	0.650	0.060	33.3333333	56.33	0.60	33.80	68.73	Az-1	
Ve-1	0.800	0.180	16.6666667	1	0.650	0.060	16.6666667	28.17	0.60	16.90	34.36	Ve-1	

19. Para poder revisar la cimentación bajo los efectos de un sismo utilizamos los parámetros provistos en el punto 7 y automáticamente obtenemos el momento generado en un sismo

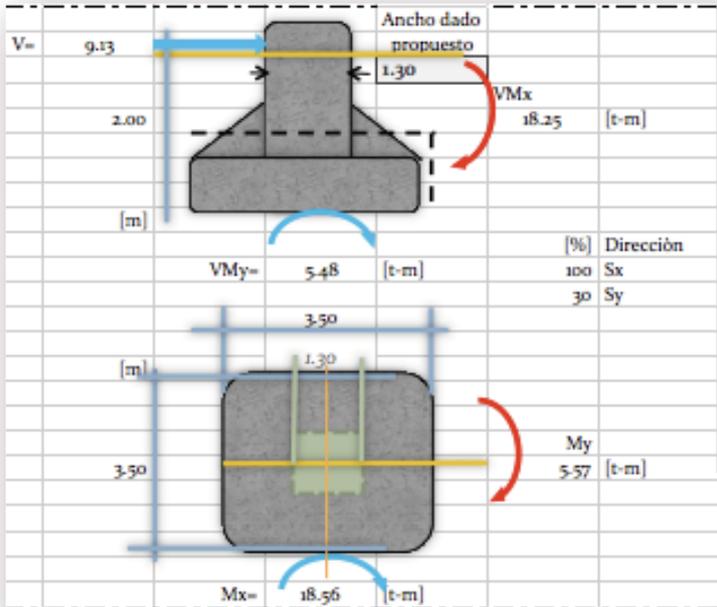
Combinaciones de cargas																	
Fuerzas Estáticas																	
Columna	Entepiso (ton/m ²)				+	Azotea (ton/m ²)			Σ [ton]	Columna	Fuerza Sísmica				Σ [ton]		
	C.M.	C.V.máx	Área	Pisos		C.M.	C.V.máx	Área			C.M.	C.V.reducida	Área	Pisos			
Am-1	0.800	0.250	16.667	1	0.650	0.100	16.667	30.00	Am-1	0.800	0.180	16.7	1	0.650	0.060	16.7	28.17
Ro-1	0.800	0.250	8.333	1	0.650	0.100	8.333	15.00	Ro-1	0.800	0.180	8.33	1	0.650	0.060	8.33	14.08
Az-1	0.800	0.250	33.333	1	0.650	0.100	33.333	60.00	Az-1	0.800	0.180	33.3	1	0.650	0.060	33.3	56.33
Ve-1	0.800	0.250	16.667	1	0.650	0.100	16.667	30.00	Ve-1	0.800	0.180	16.7	1	0.650	0.060	16.7	28.17

20. Si se encuentra en la etapa de diseño se pueden tomar como valores iniciales las dimensiones proporcionadas (celdas color "lila"). Si se encuentra en la etapa de revisión simplemente hay que introducir las dimensiones de las zapatas en este momento (celdas color "lila").

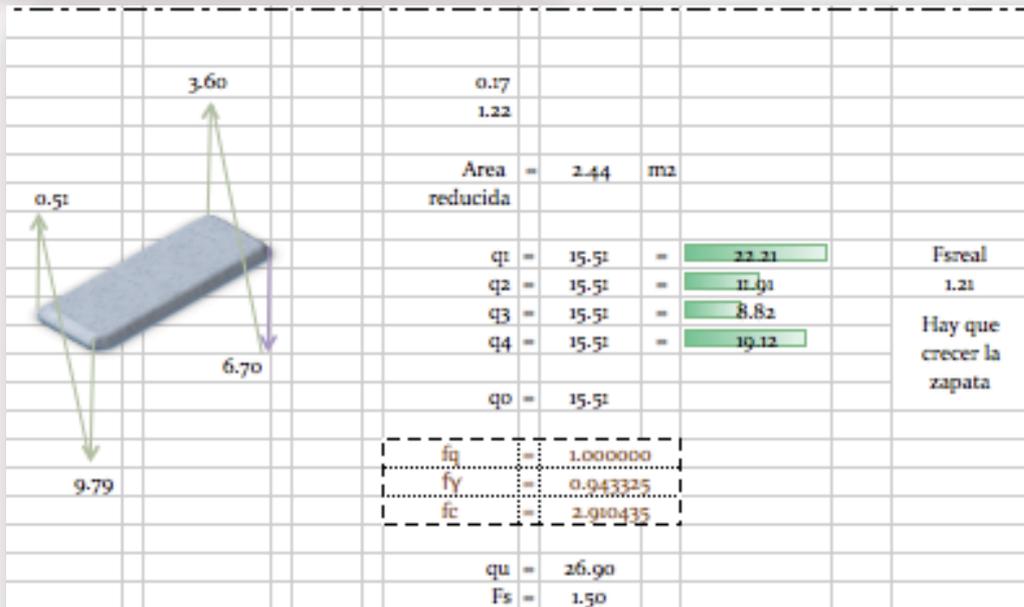
Dimensionamiento de zapatas												
Columna	Azapata[m ²]	Ladoteorico	Ladoreal	Dimensiones propuestas		Combinación 1						
	Σ/qu	√Azapata[m]	L[m]	B[m]	L[m]	C.M.+C.Vred	Cim+Relleno	ΣQ	Aprop[m ²]	qo=ΣQ/A		
Am-1	1.70	1.30	1.30	3.50	3.50	20.28	17.64	37.92	12.25	3.10		
Ro-1	3.40	1.84	1.80	4.50	4.50	40.56	29.16	69.72	20.25	3.44		
Az-1	3.40	1.84	1.80	4.30	4.30	40.56	26.63	67.19	18.49	3.63		
Ve-1	6.80	2.61	2.60	5.50	5.50	81.12	43.56	124.68	30.25	4.12		

21. El análisis sobre los esfuerzos que tendrán que soportar las esquinas de la zapatas correspondientes a cada área tributaria se realizarán de manera automática. Podemos modificar el sentido en que el sismo hace contacto con la cimentación al indicar la dirección en que éste llega al área de estudio, ya sea 100% en dirección Sx con 30% en Sy o 100% en dirección Sy con 30% dirección Sx.

Para la zapata inmersa en el área tributaria Am:



Am-1						
$q1 =$	3.10	+	$\frac{64.41}{12.51}$	+	$\frac{10.32}{12.51}$	$= 9.79$
$q2 =$	3.10	-	5.15	+	1.55	$= -0.51$
$q3 =$	3.10	-	5.15	-	1.55	$= -3.60$
$q4 =$	3.10	+	5.15	-	1.55	$= 6.70$

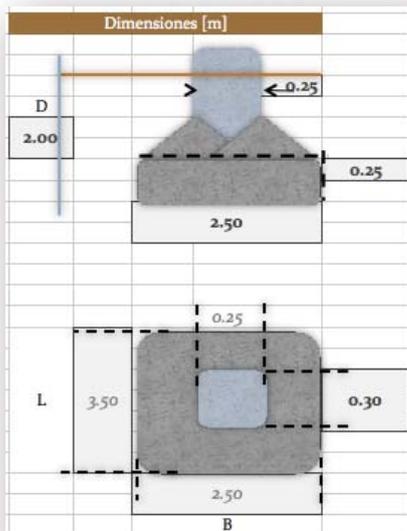


Tensión diagonal eje y						
q'	=	$\frac{\Sigma Q}{B'L'}$	=	$\frac{30.00}{6.56}$	=	4.57 [t/m ²]
Reacción total del terreno a nivel de desplante'						
q'	=	4.57	-	9.442	=	-4.8719 [t/m ²]
Acero mínimo						
p_{min}	=	0.7	$\sqrt{\frac{f_c}{f_y}}$	=	0.7	$\sqrt{\frac{200}{4200}} = 0.0023570$
$p_{balanceado}$	=	$\frac{f_c''}{f_y}$	$\frac{4800}{f_y+6000}$	=	$\frac{136}{4200}$	$\frac{4800}{10200} = 0.01524$
$p_{máx}$	=	$p_{balanceado}$	0.75	=	0.01143	
Para la sección crítica						
V	=	-4.8719	(0.57)	= -2.777 [t]
V_u	=	1.4	(-2.78)	= -3.888 [t]
		VUltima [ton/m2]	≤	VRESistente [ton/m2]		
		-2.7770		-3.8877		

Flexión eje y						
q'	=	$\frac{\Sigma Q}{B'L'}$	=	$\frac{30.00}{6.56}$	=	4.57 [t/m ²]
Reacción total del terreno a nivel de desplante'						
q'	=	4.57	-	9.442	=	-4.8719 [t/m ²]
M	=	-4.8719	$\left(\frac{1.25}{2}\right)^2$	=	-3.806	[t/m ²]
M_u	=	1.4	(-3.8061)	= -5.329 [t/m ²]
Para poder soportar el momento último se necesita						
q	=	1	$\sqrt{1 - \frac{2M_u}{F_r b d^2 f_c''}}$	=	1	$\sqrt{1 - \frac{-10.66}{2439.36}} = -0.0022$
p	=	$\frac{q f_c''}{f_y}$	=	$\frac{-0.3491}{4200}$	=	-0.0001
Area de acero						
A_s	=	$p b d$	=	-0.0064	[cm ²]	
Separación de varillas						
s	=	$\frac{a_s g}{A_c}$	=	$\frac{127.0000}{-0.0064}$	=	-19841.6939 [cm]

Temperatura						
A_s	=	$\frac{66000 \cdot 1.5 \cdot 0.5h}{f_y(0.5h+100)}$	=	$\frac{12375.0000}{420525}$	=	0.0294 [cm ² /m]
Separación de varillas						
s	=	$\frac{a_s g}{A_s}$	=	$\frac{127.0000}{0.0294}$	=	4315.6909 [cm]

22. Concluyendo con los cálculos anteriores observamos el desarrollo de las deformaciones: Comenzando con la recapitulación de los datos de una zapata más crítica y el incremento de cargas; a continuación se introduce la siguiente división de los estratos colocando sus respectivos parámetros característicos de cada tipo de suelo, tal y como se muestra en la imagen.



Por zapata		
Carga por piso	=	150.00 [t]
Pisos	=	1.00 [No.]
B	=	2.50 [m]
L	=	3.50 [m]
q _{media}	=	6.5420 [t/m ²]
q _{máxima}	=	8.0420 [t/m ²]

La "barra" azul indica el nivel de agua freática, es dinámico, sube y baja de acuerdo a la magnitud que si indique en la hoja de cálculo "capacidad de carga" al principio del ejemplo.

Descarga por excavación															
Q= 4.5420 [t/m ²]															
Profundidad															
Estrato [m]															
NAF = 0.3	A	0	* 8.25 [m]	γ _{suelo} [t/m ²]	γ _{saturada} [t/m ²]	W [%]	eo [i]	C _{rc} [i]	C _v [cm ² /s]	v [t/m ²]	M _r [t/m ²]	M _v [t/m ²]	M _e [t/m ²]	M _u [t/m ²]	M _{e'} [t/m ²]
	B	2	*	1.55	1.9	46.20%			0	0.5	0.5	0.5	500	0	0
	C	3	*	0	1.4	46.20%	6	0.96	0.002	0.5	0.5	0.5	500	700	450
	D	3.5	*	0	1.43	46.20%				0.5	0.5	0.5	500	700	450
	E	4	*	0	1.43	75.10%				0.5	0.5	0.5	500	700	450
	F	4.5	*	0	1.32	75.10%				0.5	0.5	0.5	500	400	300
	G	5	*	0	1.39	147.80%				0.5	0.5	0.5	500	400	300
		6	*	0	1.18	46.20%				0.5	0.5	0.5	500	400	400

23. Cuando no tengamos datos de algún parámetro característico del suelo se debe de dejar la “casilla” vacía para evitar cae en errores de cálculo. Recordando que para calcular la deformación del suelo debemos conocer la distribución de esfuerzos bajo una esquina de la cimentación, por lo que a partir de este punto el programa realiza los cálculos de manera automática.

Las letras “x” y “y” representan la mitad del largo y ancho respectivamente de la zapata; el cálculo de deformaciones se realizó por dos ecuaciones distintas y luego se comparará a través de una gráfica, esta en el usuario elegir los resultados que favorezcan al proyecto.

Influencia a X distancia			Asentamiento inmediato						
X=	8.3	m	Esfuerzos			Expansión por excavación			
Y=	19.9	m			σ_z	σ_x	σ_y	Hook	Steinbrenner
ξ	Z	D	Pvo'	Pco'				δe_1	δe_1
[i]	[m]	[m]	[t/m2]	[t/m2]	[t/m2]	[t/m2]	[t/m2]	[m]	[m]
0.5		2	3.8						
0.5	0.50	1.00	5.2		1.135390	1.047816	1.081179	0.000142	
0.5	1.25	0.50	5.915		1.133818	0.919045	1.000493	0.000174	A 21.910557
0.5	1.75	0.50	5.915		4.523996	3.346846	3.790947	0.000955	H 4.000000 [m]
0.5	2.25	0.50	5.915		4.504962	3.033255	3.584677	0.001196	H*(tan-LB/HA) 352.3562 1-V-2V2 0 q/2πMe 0.001446
0.5	2.75	0.50	5.915		4.476999	2.738300	3.384223	0.001416	((B^2+H^2))^1/2 9.16896 L+(((L^2+B^2))^1/2) 41.44234 B (L+A) 344.9371 Bln(todo lo anterior) 0.797951
0.5	3.5	1.00	5.915		4.417168	2.334869	3.096310	0.003403	((L^2+H^2))^1/2 20.29803 B+(((L^2+B^2))^1/2) 29.79234 L (B+A) 600.1951 Lln(todo lo anterior) 0.149657
									q(1-v^2)/(πMe) 0.002169
								Σδe= 0.007286 [m] 0.728582 [cm]	Σδe= 0.008220 [m] 0.822010 [cm]



Los resultados del asentamiento se presentan tanto en metros como en centímetros.

Ahora, para asentamiento por compresión

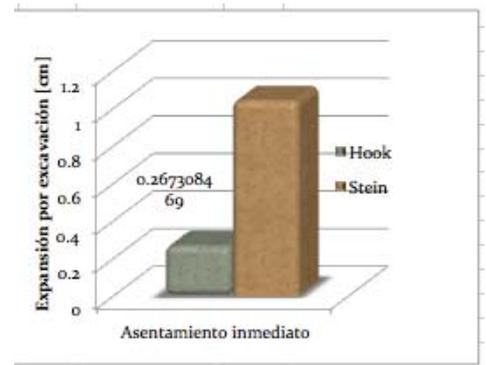
Incremento neto de presión		Esfuerzos				Asentamiento por compresión		
Estrato	Prof [m]	Mu [t/m ²]	ox [t/m ²]	oy [t/m ²]	Hook δe_1 [m]	Steinbrenner δe_1 [m]		
A	0	0						
B	2	700	0.874915	0.807432	0.833141	7.80408E-05		
C	3	700	0.873704	0.708203	0.770966	0.000096		
D	3.5	700	3.486126	2.579031	2.921249	0.000525704		
E	4	400	3.471459	2.337383	2.762300	0.001152		
F	4.5	400	3.449911	2.110094	2.607834	0.001363684		
G	5	400	3.403806	1.799216	2.385972	0.003278		
H	6							
					$\Sigma \delta e =$	0.00649 [m]	$\Sigma \delta e =$	0.007917867 [m]
						0.64933 [cm]		0.791786664 [cm]



Los resultados del asentamiento se presentan tanto en metros como en centímetros.

Para el asentamiento diferido observamos

Incremento neto de presión								
Estrato	Prof [m]	Q= 2.000 [t/m ²]	Me' [t/m ²]	v [t/m ²]	Esfuerzos			Asentamiento diferido
					σ_z [t/m ²]	σ_x [t/m ²]	σ_y [t/m ²]	Hook δe_1 [m]
A	0	8.25	0	0				
B	2	*	450	0	0.874915	0.461390	0.476081	0.001944256
C	3	*	450	0	0.499259	0.919045	1.000493	0.000555
D	3.5	*	450	0	1.992072	1.473732	1.669285	0.002213413
E	4	*	300	0	1.983691	1.335647	1.578457	0.003306
F	4.5	*	300	0	1.971378	1.205768	1.490191	0.00328563
G	5	*	300	0	1.945032	1.028124	1.363412	0.004863
H	6							$\Sigma \delta e =$ 0.016166764 [m] 1.616676376 [cm]



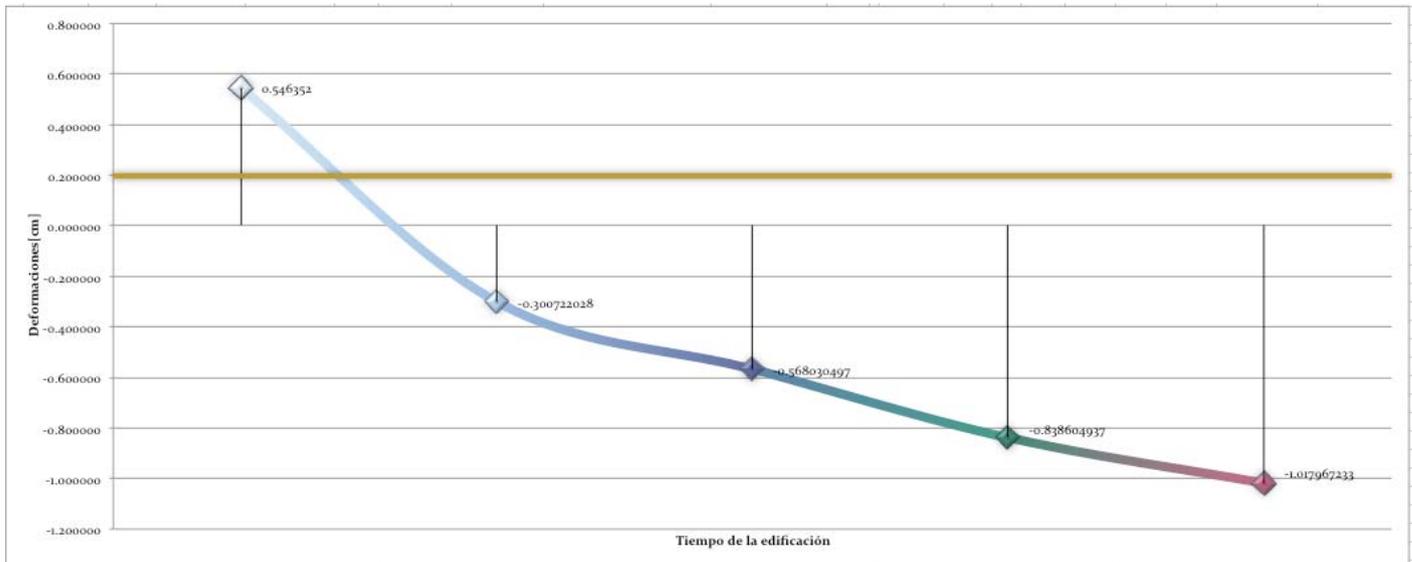
Para la consolidación primaria tenemos lo siguiente.

Incremento neto de presión														
Estrato	Prof [m]	Q= 2.000 [t/m ²]	Cv [cm ² /s]	e [t/m ²]	Z (centro del estrato) [m]	Esfuerzos			Terzaghi δe_1 [m]					
						σ_z [t/m ²]	σ_x [t/m ²]	σ_y [t/m ²]	[segundos]	He[cm]	Fac. tiempo T	U[%]	δe_2	
A	0	8.25			2	0.497087	0.350934	0.405895						
B	4	*	0.00027	6	5.50	0.458044	0.164728	0.265894	8812800	150	0.1057536	0.378665233	0.27057444	
									10540800	150	0.1264896	0.413683398	0.29559659	
									11404800	150	0.1368576	0.429185564	0.30667363	
									12268800	150	0.1472256	0.44360005	0.31697348	
C	7	*												
D	0	*												
E	0	*												
F	0	*												
G	0	*												
H	0												$\Sigma \delta e =$ 0.00270574 [m] 0.27057444 [cm]	

Para finalmente obtener la consolidación secundaria

Incremento neto de presión										Consolidación secundaria			
Prof Estra [m]	Q= 2.000 8.25 [t/m2]	Mt [t/m2]	Mv [t/m2]	ξ [i]	Cv [cm2/s]	Z (centro del estrato) [m]	Esfuerzos			Zeevaert			
							σz [t/m2]	σx [t/m2]	σy [t/m2]	δe1			
										días	He[cm]	Fac. tiempo T	δe2
A	*	0.5	0.5			2	0.497087	0.350934	0.405895				
B	*	0.0048	0.005	0.46	0.00027	5.50	0.458044	0.164728	0.265894	157680000	150	1.89216	0.1793623
										252288000	150	3.027456	0.24989971
										409968000	150	4.919616	0.33877497
										630720000	150	7.56864	0.42967233
C	*	0.5	0.5										
D	*	0.5	0.5										
E	*	0.5	0.5										
F	*	0.5	0.5										
G	*	0.5	0.5										
H													
												Σδe=	0.00179362 [m]
													0.1793623 [cm]

Para poder tener un panorama general de las deformaciones observamos la siguiente gráfica.



Conclusión

5



Conclusión:

A través del tiempo se ha llegado al punto en que se sabe que los hundimientos en las construcción son de un 30% mayor al calculado, esto porque se hacen consideraciones que simplifican el comportamiento del suelo. Afortunadamente con las herramientas de cómputo podemos introducir ecuaciones que se asemejan al comportamiento real de los suelos y mostrarnos un resultado acorde a la realidad.

El programa de cómputo CimDeCa simula efectos de hundimiento y predice la capacidad de carga bajo parámetros que nosotros introducimos (sobre la masa de suelo que vamos a analizar), sin embargo es necesario recordar que: las cargas transmitidas al suelo se perciben normalmente a cierta profundidad, en esta profundidad el suelo se comprime debido a los esfuerzos impuestos causando que el volumen de la masa del suelo disminuya y se presente el asentamiento de la estructura.

Los hundimientos excesivos deben evitarse a toda costa, ya que interfieren con el funcionamiento correcto del edificio; a medida en que se agrietan y “fluyen” los elementos estructurales de la edificación se disipa los efectos de un hundimiento diferencial por esta razón una cimentación se encuentra diseñada de manera tal que los hundimientos se mantengan dentro de un cierto rango.

Para el efecto de deformación debemos recordar que los suelos friccionantes tienen, un alto grado del coeficiente de permeabilidad provocando que se expulse agua y aire rápidamente ocasionando que la compresión de arenas ocurra durante la construcción y termine en cuanto se finalice la edificación. El grado de humedad debe tratarse con cuidado ya que en un sismo puede darse el fenómeno conocido como licuación. Mientras que los suelos cohesivos presentan un valor muy bajo de permeabilidad, provocando que la consolidación se base en qué tan rápido se expulsa agua y por consiguiente dependa del tiempo. Es importante conocer el grado de saturación del suelo ya que pueden perder su cohesión y convertirse en líquidos. En las curvas de esfuerzo deformación tenemos distintos comportamientos, por ejemplo con el acero tenemos un comportamiento lineal elástico (hasta su punto de quiebre) y regresará a su forma original en cuanto se le deje de aplicar un esfuerzo, también se puede dar el caso de que la curva esfuerzo deformación sea no lineal y aun así presentar un comportamiento elástico. Aun más interesante es considerar al tiempo como variable, es entonces que al material se le considera como visco-elástico tal y como se observó en el ejemplo de aplicación.

Apéndice

Factores de comportamiento sísmico de acuerdo al Reglamento de construcciones del Distrito Federal	
Q=1	Para estructuras con resistencia a fuerzas laterales es suministrada parcialmente por distintos materiales o elementos estructurales.
Q=1.5	Para estructuras con resistencia a fuerzas laterales es suministrada en la totalidad de los entrepisos por muros de mampostería de piezas huecas.
Q=2	Para estructuras con resistencia a fuerzas laterales es suministrada por columnas de concreto reforzado o acero.
Q=3	La resistencia en todos los entrepisos se da por las columnas de acero.
Q=4	La resistencia que presentan todos los entrepisos de la estructura es proporcionada por marcos no contraventados de acero o concreto reforzado capaces de resistir por lo menos el 50% de la fuerza sísmica actuante.

Bibliografía:

- Meli, Roberto, *Diseño estructural*, 2ed, México: Limusa, 2009.
- Deméneghi, Colina; Puebla Margarita; Sanginés, Hector. *Apuntes de análisis y diseño de cimentaciones*. México: Departamento de publicaciones de la facultad de ingeniería, 2008. 595 p.
- Gallo, Gabriel; Espino, Luis; Olvera, Alfonso. *Diseño estructural de casas habitación*, 2ed. México: McGraw Hill, 2005. 187 p.