

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:

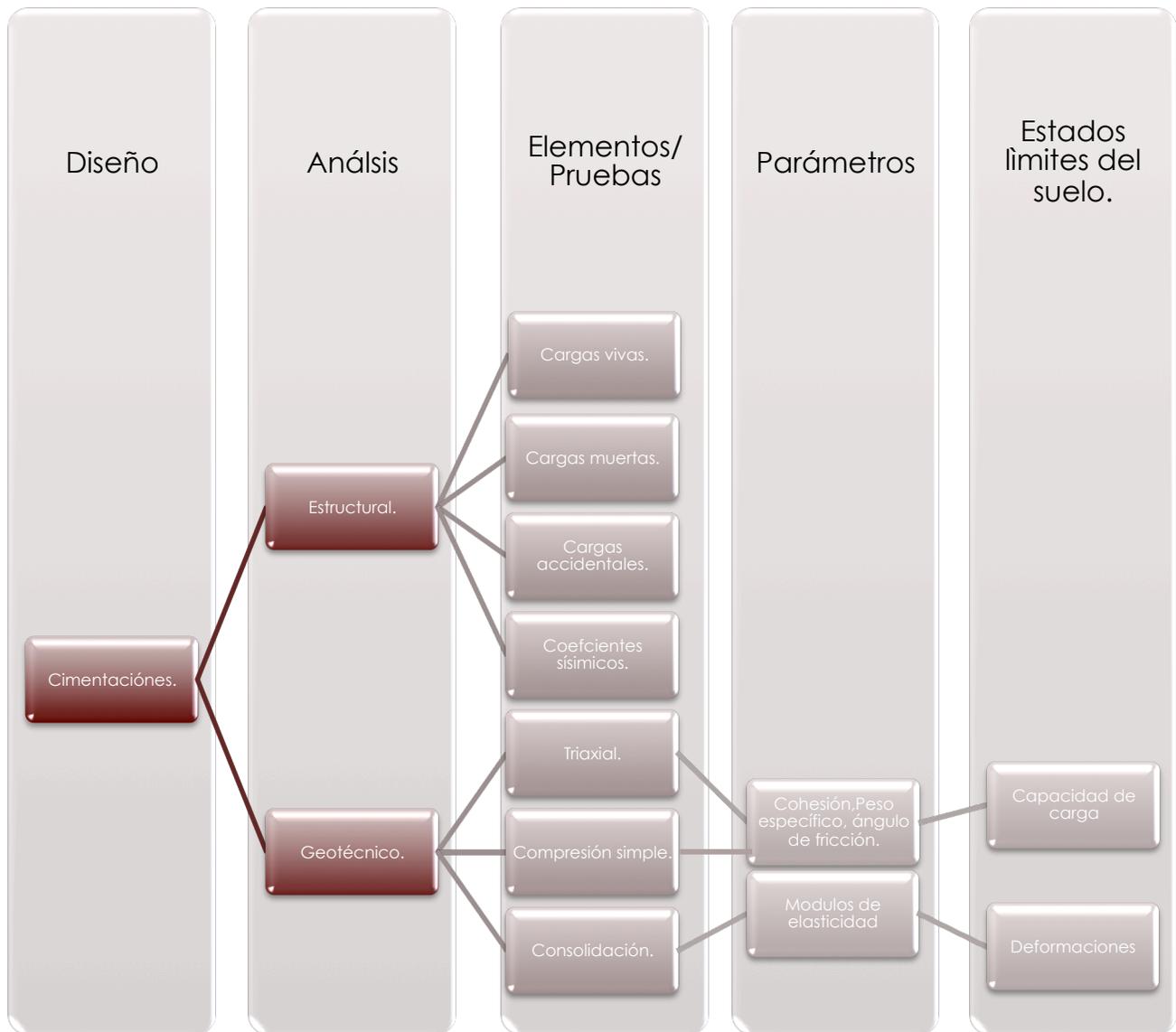
1. Compresión Triaxial.
2. Consolidometro.

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:

<p>Cargas muertas (acciones permanentes)</p>	<p>Cargas Vivas (acciones variables)</p>	<p>Cargas Accidentales (acciones accidentales)</p>
<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.

La 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:

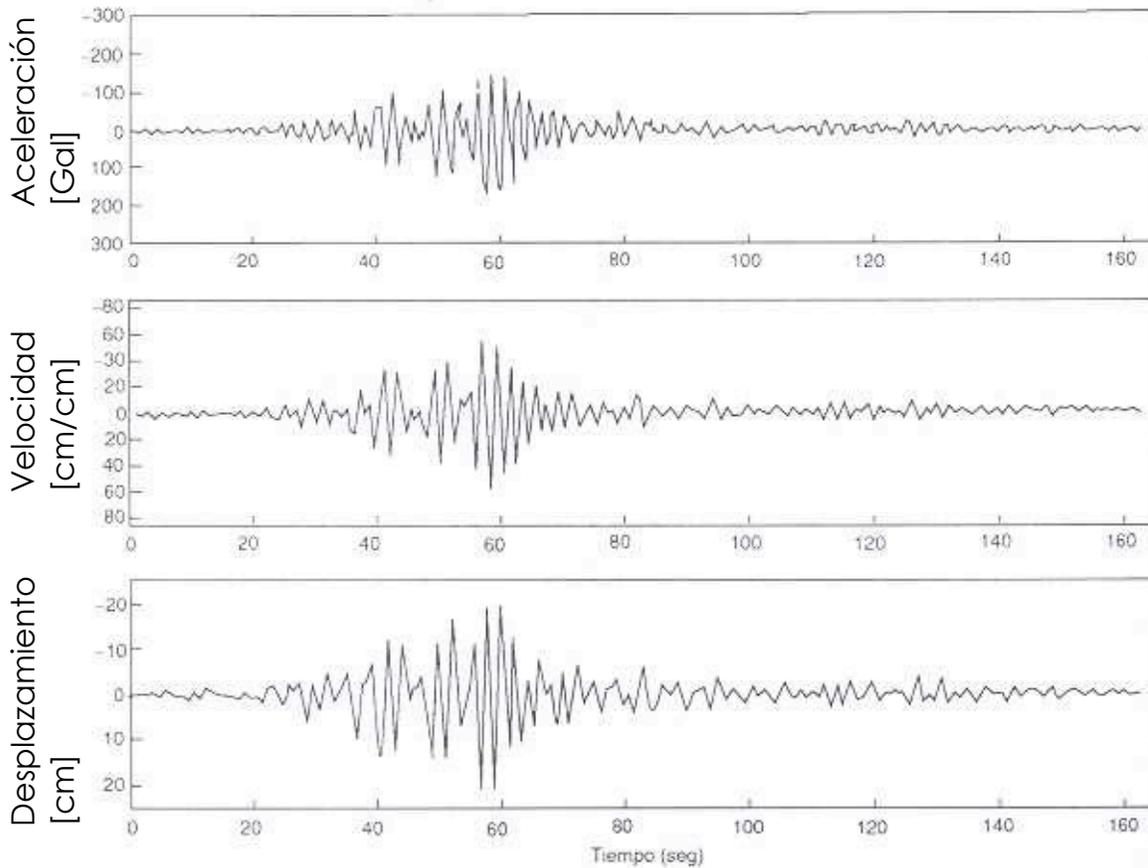
Para cualquier estructura observamos que los efectos devastadores de un sismo se encuentran compuestos por la intercalación de vibraciones armónicas (mismo periodo entre la construcción y el sismo) y por inestabilidad del suelo (fenómenos de licuación en arenas, deslizamiento de laderas).

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.



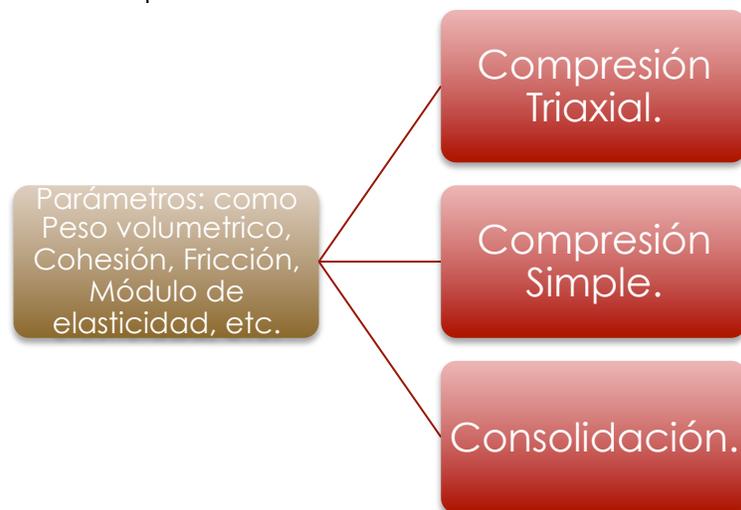
Sismo de 1985, México 1

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.

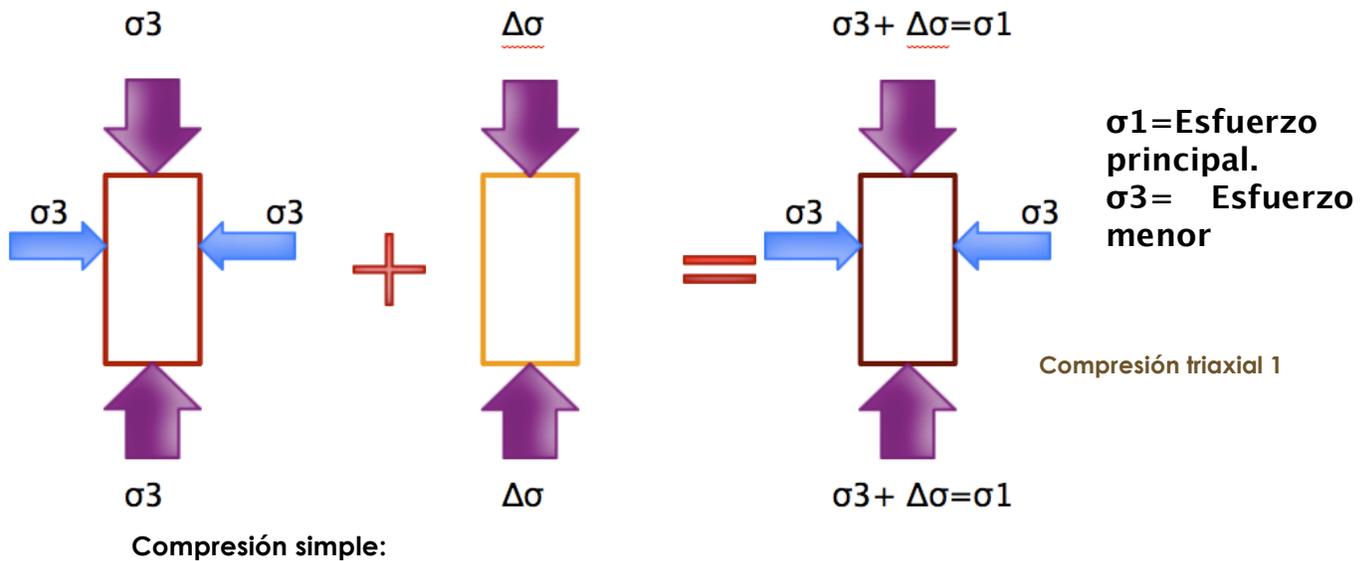
Las tres pruebas mostradas a continuación nos proporcionan los siguientes parámetros útiles en el diseño y revisión de cimentaciones. Toda clase de suelo puede estar sujeta estas pruebas de laboratorio ya que no son exclusivas de un solo tipo de suelo.



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.



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.

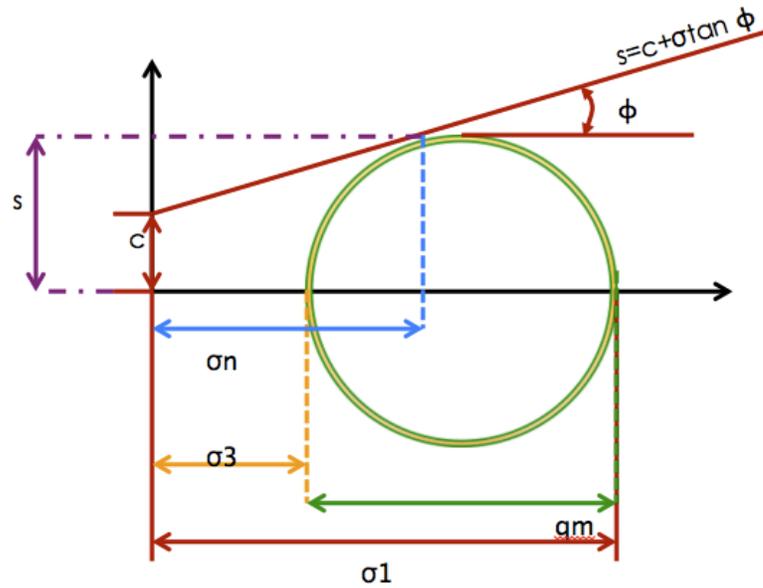
$$s = c + \sigma_n \tan \phi$$

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.

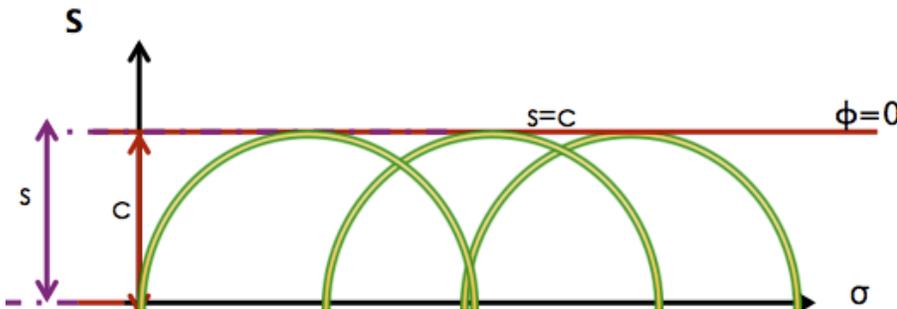
Por medio de la prueba triaxial obtenemos tres parámetros importantes:

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

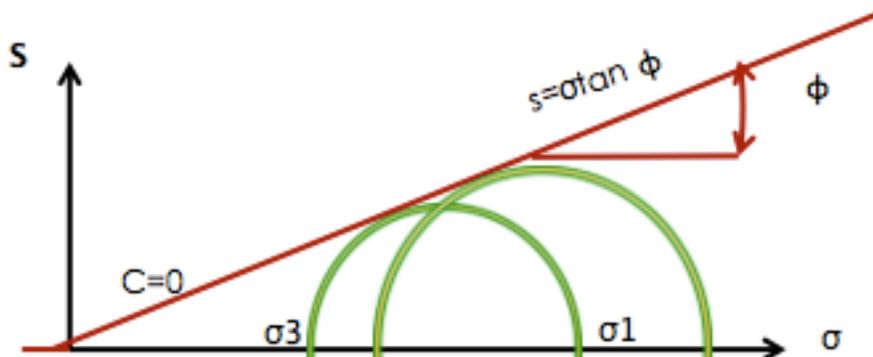


La recta de esfuerzo cortante o plano de falla es característico de cada tipo de suelo, de ahí que sea un parámetro para encontrar el punto que falla el material bajo una cierta combinación de esfuerzos normales y cortantes.

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:

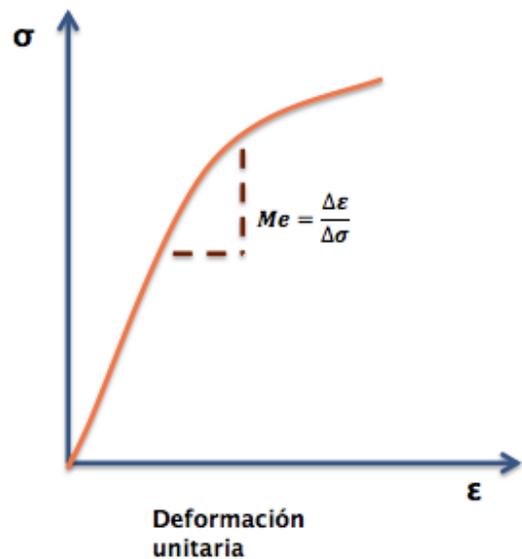
Es una prueba que se realiza con el objetivo de simular una consolidación unidimensional y si bien arroja buenos resultados con distintos tipos de suelo ésta se enfoca a la compresibilidad de arcillas totalmente saturadas.

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.

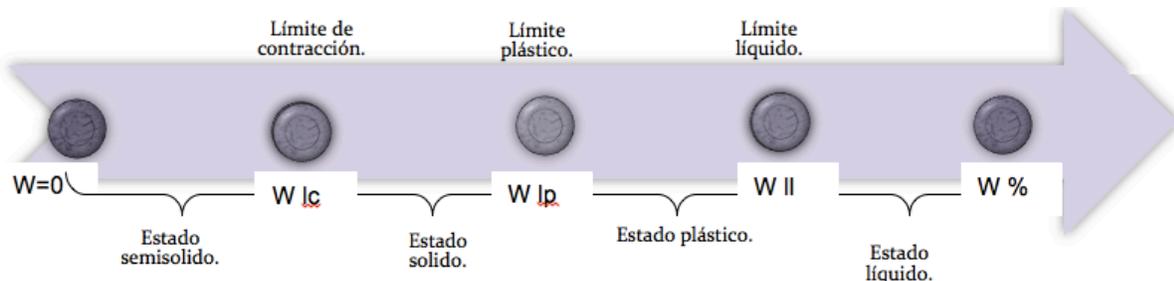
Ángulo de fricción interna “Φ”:

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 y [ton/m ³]	Angulo de fricción interna ϕ [°]
Arcilla de compactación 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 de 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.



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.