# FUNDAMENTOS DE SUELOS

Dr. Carlos Alberto Charles Cruz

# CURSO
# DE
# FUNDAMENTOS DE SUELOS
# Y ROCAS

## SEPTIEMBRE 2023


## DR. CARLOS ALBERTO CHARLES CRUZ

**PhD Leeds University 2007**
**MSc Tulane University 1994**
**IC FIC UANL 1991**

# TABLA DE CONTENIDO

**INTRODUCCIÓN** ..... **1**

MECANICA DE SUELOS ..... 1
¿QUE ES LA MECANICA DE SUELOS? ..... 1
*¿CUAL ES SU IMPORTANCIA?* ..... *1*
LA INGENIERIA GEOTECNICA ..... 2
ESTUDIOS DE MECANICA DE SUELOS ..... 4
ESTRUCTURA DEL CURSO DE FUNDAMENTOS DE SUELOS Y ROCAS ..... 7

**ORIGEN Y FORMACION DE SUELOS** ..... **8**

ROCAS ..... 8
*MINERALES FORMADORES DE ROCAS* ..... *11*
METEORIZACION, EROSION Y TRANSPORTE ..... 12
*SUELOS RESIDUALES Y TRANSPORTADOS* ..... *13*
RELACIONES DE FASE ..... 17
*Pesos Volumétricos* ..... *18*
*RELACIONES FUNDAMENTALES* ..... *19*
ACTIVIDADES PROPUESTAS ..... 21

**CLASIFICACION DE SUELOS** ..... **19**

ANALISIS GRANULOMÉTRICO ..... 19
PRUEBA DEL HIDRÓMETRO ..... 22
LÍMITES DE ATTERBERG ..... 24
*Límites de Consistencia para clasificación de suelos* ..... *25*
SISTEMA DE CLASIFICACIÓN SUCS ..... 27
*Clasificación de Suelos Gruesos* ..... *28*
*Clasificación de Suelos Finos* ..... *29*

**COMPACTACIÓN** ..... **31**

PRUEBA PROCTOR ..... 33
*PRUEBA PROCTOR ESTANDAR Y PROCTOR MODIFICADA* ..... *34*
*HUMEDAD OPTIMA Y DENSIDAD SECA MAXIMA* ..... *35*
*CURVA DE COMPACTACION Y LINEA DE CERO VACIOS* ..... *37*

**PERMEABILIDAD EN SUELOS** ..... **40**

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD ..... 41
PERMEÁMETRO DE CARGA CONSTANTE ..... 42
PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE ..... 43

**CONSOLIDACIÓN** ..... **46**

CONSOLIDACION Y ASENTAMIENTOS ..... 47
TEORIA DE CONSOLIDACION ..... 48
*GENERALIDADES* ..... *48*
*Coeficiente de consolidación.* ..... *49*
*CURVA DE COMPRESIBILIDAD* ..... *50*
*INDICE DE COMPRESIBILIDAD* ..... *50*
**RESISTENCIA AL CORTANTE EN SUELOS ..... 51**
PRUEBAS DE RESISTENCIA AL CORTE ..... 52
*Ensayo de Corte Directo:* ..... *52*
*Prueba de compresión axial no confinada* ..... *53*
*Ensayo de Corte Triaxial:* ..... *54*
**INTRODUCCION A LA MECANICA DE ROCAS ..... 59**
INDICE DE CALIDAD DE ROCA (RQD) ..... 60
**REFERENCIAS DEL CURSO ..... 62**

# INTRODUCCIÓN

## MECANICA DE SUELOS

## ¿QUE ES LA MECANICA DE SUELOS?

La mecánica de suelos es una rama de la ingeniería civil que se enfoca en el estudio del comportamiento mecánico de los suelos y su interacción con estructuras y cimentaciones. Es una disciplina fundamental para el diseño y construcción de obras geotécnicas, como edificios, carreteras, presas, puentes, entre otros.

## ¿CUAL ES SU IMPORTANCIA?

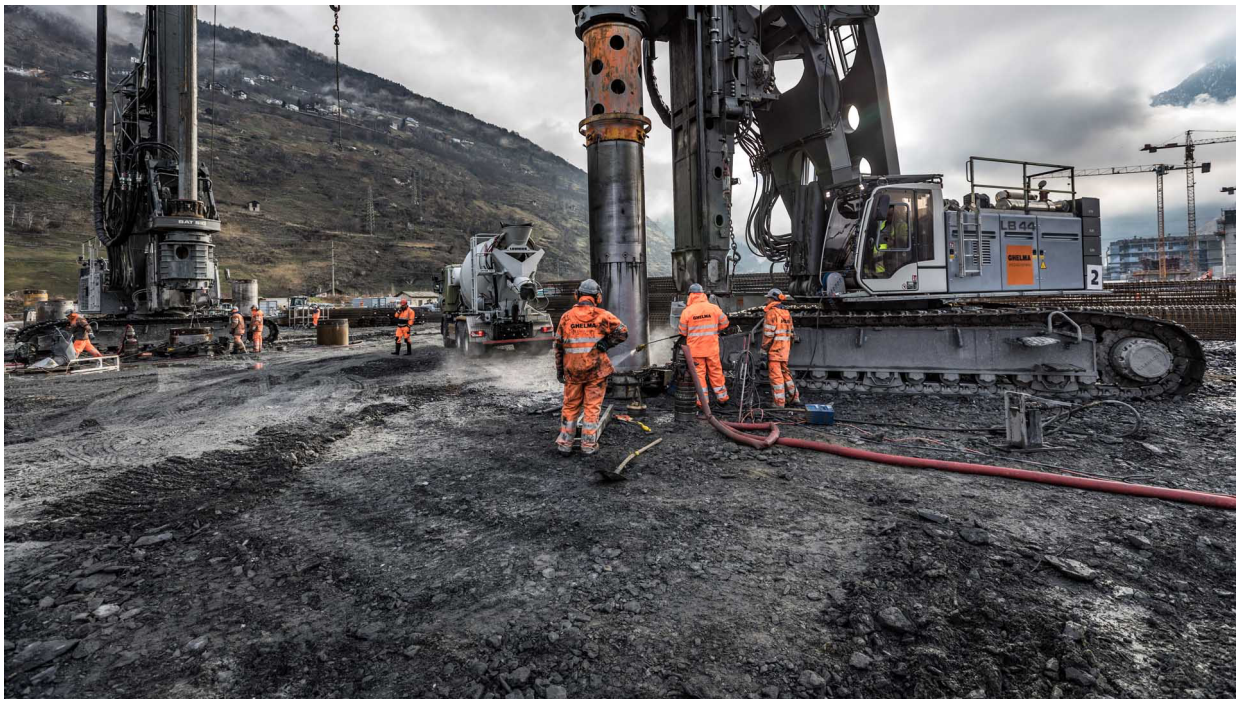
La importancia de la mecánica de suelos radica en comprender las propiedades y características de los suelos, ya que estos son un material natural complejo y variable que puede tener una gran influencia en el desempeño de las estructuras. Algunos de los aspectos más relevantes que se abordan en esta disciplina incluyen:

1. Caracterización de suelos: Se estudian las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los suelos, como la densidad, porosidad, permeabilidad, resistencia, consolidación y expansión, entre otros.
2. Clasificación de suelos: Los suelos se clasifican en diferentes categorías según sus características y comportamiento. Existen varios sistemas de clasificación, siendo uno de los más comunes el sistema unificado de clasificación del suelo (Unified Soil Classification System - USCS).

3. Comportamiento bajo carga: Se estudia cómo los suelos se deforman y responden bajo la acción de cargas aplicadas. Esto incluye la determinación de asentamientos y la capacidad portante de un suelo para soportar estructuras sin fallar.
4. Estabilidad de taludes: Se analiza la estabilidad de las laderas y taludes naturales o artificiales para prevenir deslizamientos y colapsos.
5. Diseño de cimentaciones: Se desarrollan métodos para diseñar cimentaciones adecuadas para diferentes tipos de estructuras, asegurando una transferencia segura de cargas al suelo subyacente.
6. Mejoramiento del suelo: Se investigan técnicas para mejorar las propiedades de los suelos y aumentar su capacidad portante, como la compactación, la inyección de grava, el drenaje y la estabilización química.

Es esencial realizar estudios geotécnicos antes de iniciar cualquier proyecto de ingeniería civil, para obtener una comprensión profunda de las condiciones del suelo en el sitio de la obra y tomar decisiones fundamentadas en el diseño y la construcción. La mecánica de suelos es una disciplina en constante evolución, y los avances en esta área contribuyen significativamente a la seguridad y eficiencia de las obras geotécnicas.

## LA INGENIERIA GEOTECNICA



La ingeniería geotécnica es una rama de la ingeniería civil que se enfoca en el estudio y análisis de las propiedades mecánicas, hidráulicas y geológicas del suelo y las rocas, así como su interacción con las estructuras y cimentaciones. Su objetivo principal es proporcionar soluciones seguras y eficientes para el diseño, construcción y mantenimiento de obras geotécnicas, como edificios, carreteras, puentes, presas, túneles, entre otras infraestructuras.

Los ingenieros geotécnicos desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de proyectos de ingeniería, ya que trabajan para comprender el comportamiento del suelo y las rocas en un sitio específico, y así tomar decisiones informadas para garantizar la estabilidad y seguridad de las estructuras. Algunas de las principales áreas de estudio y aplicaciones de la ingeniería geotécnica incluyen:

1. Investigaciones geotécnicas: Se realizan estudios de campo y de laboratorio para caracterizar las propiedades del suelo y las rocas en el sitio de la obra. Esto incluye análisis de muestras de suelo y roca, pruebas de laboratorio para determinar sus propiedades mecánicas y estudios geológicos para entender la formación del terreno.
2. Diseño de cimentaciones: Los ingenieros geotécnicos diseñan cimentaciones adecuadas para las estructuras, asegurándose de que sean capaces de soportar las cargas previstas y distribuir las fuerzas de manera segura en el suelo o roca subyacente.
3. Estabilidad de taludes y laderas: Se evalúa la estabilidad de pendientes naturales o artificiales para evitar deslizamientos y colapsos, y se implementan medidas de mitigación para garantizar la seguridad.
4. Control de la erosión: Los ingenieros geotécnicos trabajan en soluciones para prevenir y controlar la erosión del suelo, protegiendo las obras geotécnicas de los efectos negativos de la erosión.
5. Mejoramiento del suelo: Se investigan y aplican técnicas de mejora del suelo para aumentar su capacidad portante, drenaje, resistencia y otras propiedades, permitiendo el desarrollo de proyectos en terrenos desafiantes.
6. Estudios de riesgos geotécnicos: Se realizan evaluaciones de riesgos geotécnicos para identificar posibles problemas y desafíos en proyectos, y tomar medidas de mitigación para reducir los riesgos asociados.

En resumen, la ingeniería geotécnica es una disciplina crucial que asegura la estabilidad y durabilidad de las obras geotécnicas, lo que contribuye a la seguridad y éxito de proyectos de ingeniería civil en diferentes ámbitos. Los ingenieros geotécnicos trabajan en estrecha colaboración con otras disciplinas de la ingeniería y arquitectura para lograr soluciones integrales y eficientes.

# ESTUDIOS DE MECANICA DE SUELOS

Los estudios de mecánica de suelos son una parte fundamental de los proyectos de ingeniería civil y geotécnica. Estos estudios tienen como objetivo comprender y evaluar las propiedades y comportamiento del suelo en un sitio específico, lo que permite diseñar cimentaciones y estructuras adecuadas, así como prevenir problemas geotécnicos durante la construcción y la vida útil de las obras. A continuación, se describen los principales aspectos involucrados en los estudios de mecánica de suelos:

1. Recopilación de datos: Se inicia con la recopilación de información existente sobre el área de estudio, como mapas geológicos, informes previos, datos climáticos y registros de exploraciones anteriores.
2. Investigación geológica y geotécnica: Se lleva a cabo un estudio geológico y geotécnico detallado para comprender la formación geológica del sitio y la distribución de los diferentes tipos de suelos presentes.
3. Muestreo de suelos: Se realizan perforaciones y/o excavaciones para obtener muestras representativas del suelo en diferentes profundidades. Estas muestras serán analizadas en el laboratorio.
4. Pruebas de laboratorio: Las muestras de suelo recopiladas se someten a diversas pruebas en el laboratorio para determinar sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Entre las pruebas

comunes se encuentran la granulometría, límites de Atterberg, compactación, resistencia al corte, permeabilidad, entre otras.

5. Caracterización del suelo: Con base en los resultados de las pruebas de laboratorio, se caracterizan los diferentes tipos de suelos presentes en el sitio, identificando sus propiedades y comportamiento.
6. Análisis de propiedades geotécnicas: Se realizan análisis e interpretación de los datos obtenidos para comprender cómo el suelo responderá bajo diferentes condiciones de carga y las posibles interacciones con las estructuras.
7. Estudios de riesgos geotécnicos: Se lleva a cabo una evaluación de los posibles riesgos geotécnicos asociados al sitio, como deslizamientos, asentamientos, licuefacción, entre otros, para tomar medidas de mitigación adecuadas.
8. Diseño de cimentaciones y estructuras: Con base en la información obtenida, se procede a diseñar las cimentaciones y estructuras que sean adecuadas para las condiciones del suelo y las cargas previstas.
9. Estabilidad de taludes: Se realiza un análisis de la estabilidad de laderas y taludes naturales o construidos para prevenir deslizamientos y colapsos.
10. Mejoramiento del suelo: Si el suelo tiene propiedades no adecuadas para la construcción, se estudian técnicas de mejoramiento como la compactación, preconsolidación, drenaje, columnas de grava, inyección de cemento, entre otras.
11. Conclusiones y recomendaciones: Se resumen los resultados y se proporcionan recomendaciones para la planificación, diseño y construcción de la obra, teniendo en cuenta las características del suelo y los riesgos geotécnicos identificados.
12. Reporte final: Se presenta un informe técnico detallado que incluye toda la información recopilada, los análisis realizados y las recomendaciones para la obra en base a los estudios de mecánica de suelos.

En resumen, los estudios de mecánica de suelos son esenciales para el desarrollo exitoso de proyectos de ingeniería civil, proporcionando información clave para tomar decisiones informadas y garantizar la seguridad y durabilidad de las obras geotécnicas.

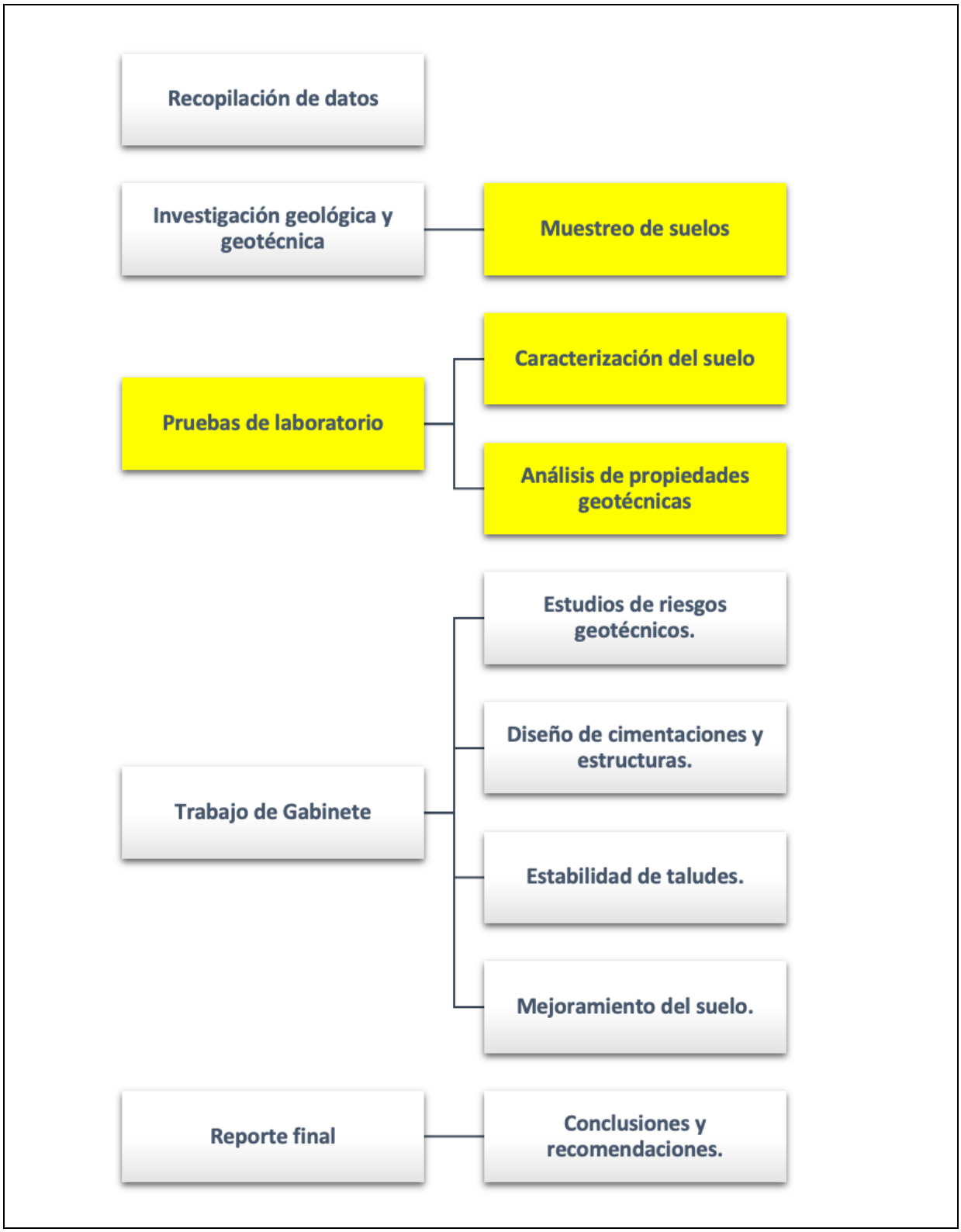



**Figura 1.1. Etapas en las que se divide un estudio geotécnico de un sitio para un proyecto.**

# ESTRUCTURA DEL CURSO DE FUNDAMENTOS DE SUELOS Y ROCAS

En el curso de Fundamentos de Suelos y Rocas, se enfocara en los aspectos de investigacion de las propiedades del terreno. En este sentido se hara enfasis en la caracterización geotécnica del terreno y el analisis de sus propiedades fisicas y mecanicas.

Por ende, el curso va a la par que las practicas de laboratorio y en general se puede dividir en las siguientes etapas.

**Figura 1.2. Estructura del curso de Fundamentos de Suelos y Rocas. (Entre parentesis se muestra el numero de la práctica de laboratorio correspondiente)**

# ORIGEN Y FORMACION DE SUELOS

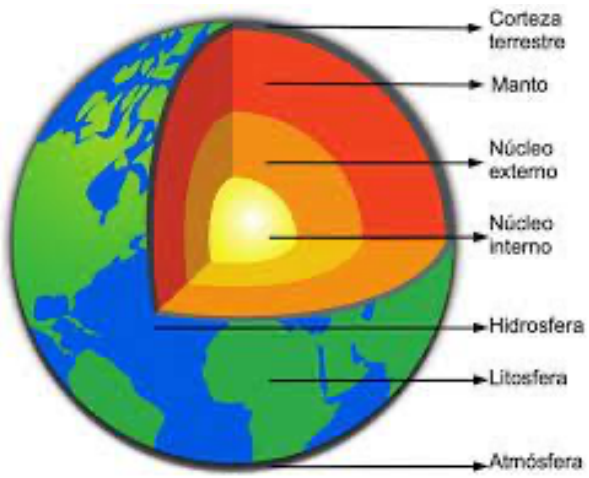



**Figura 1.4 Esquematico de las capas de la corteza terrestre.**

La geología juega un papel fundamental en el origen y formación del suelo, ya que es el estudio de los procesos geológicos que dan lugar a la roca madre o material parental que se descompone para formar los suelos.

## ROCAS

La corteza terrestre es la capa externa y más delgada del planeta Tierra. Está compuesta por una variedad de rocas, minerales y elementos químicos. En general, la corteza terrestre se puede dividir en dos tipos principales: corteza continental y corteza oceánica.

Corteza Continental:

La corteza continental es la que se encuentra bajo los continentes y áreas emergidas del planeta. Está compuesta principalmente por rocas graníticas y sedimentarias. Los principales elementos que se encuentran en la corteza continental son:

- Oxígeno (O)
- Silicio (Si)
- Aluminio (Al)
- Hierro (Fe)
- Calcio (Ca)
- Sodio (Na)

- Potasio (K)
- Magnesio (Mg)

Corteza Oceánica:

La corteza oceánica es la que se encuentra bajo los fondos marinos. Es más delgada que la corteza continental y está compuesta principalmente por rocas basálticas. Los principales elementos presentes en la corteza oceánica son:

- Oxígeno (O)
- Silicio (Si)
- Magnesio (Mg)
- Hierro (Fe)

Además de estos elementos principales, la corteza terrestre también contiene una variedad de otros elementos en cantidades más pequeñas, como titanio, aluminio, potasio, sodio y calcio, entre otros.

Debemos de comenzar por recordar los tipos de rocas según su origen, pues su descomposicion da lugar a diversos tipos de suelos.

Las rocas se clasifican en tres tipos principales en función de su origen y forma de formación. Estos tipos de rocas son:

1) Rocas ígneas: Son rocas formadas a partir del enfriamiento y solidificación del magma o lava. El magma es una masa fundida que se encuentra debajo de la superficie terrestre, mientras que la lava es el magma que ha salido a la superficie a través de erupciones volcánicas. Las rocas ígneas pueden clasificarse en dos subtipos:
   a) Rocas ígneas intrusivas o plutónicas: Se forman cuando el magma se enfría lentamente en el interior de la corteza terrestre, lo que permite el crecimiento de cristales de diferentes minerales. Ejemplos de rocas ígneas intrusivas incluyen granito y diorita.
   b) Rocas ígneas extrusivas o volcánicas: Se forman cuando la lava se enfría rápidamente en la superficie terrestre debido a la exposición al aire o al agua, lo que da lugar a la formación de pequeños cristales. Ejemplos de rocas ígneas extrusivas incluyen basalto y riolita.
2) Rocas sedimentarias: Estas rocas se forman a partir de la acumulación y compactación de sedimentos producidos por la erosión y la meteorización de otras rocas o materiales orgánicos. Los procesos de sedimentación y diagenesis transforman estos sedimentos en rocas sedimentarias. Pueden ser subdivididas en:

a) Rocas sedimentarias clásticas: Formadas por la acumulación de fragmentos y partículas de otras rocas que se han transportado y depositado por acción del agua, el viento o el hielo. Ejemplos incluyen conglomerado, arenisca y lutita.
b) Rocas sedimentarias químicas: Provenientes de la precipitación de minerales disueltos en soluciones acuosas, que luego se acumulan y forman rocas. Ejemplos incluyen el yeso y la sal.
c) Rocas sedimentarias orgánicas: Se forman a partir de la acumulación y compresión de restos orgánicos, como es el caso del carbón y algunas rocas como la turba y la lignita.

3) Rocas metamórficas: Son rocas que han sido sometidas a altas presiones, temperaturas o ambas, modificando su mineralogía, textura y estructura sin llegar a fundirse. Se forman a partir de la transformación de rocas preexistentes, ya sean ígneas, sedimentarias o metamórficas. Algunos ejemplos de rocas metamórficas son el mármol, el esquisto y la pizarra.

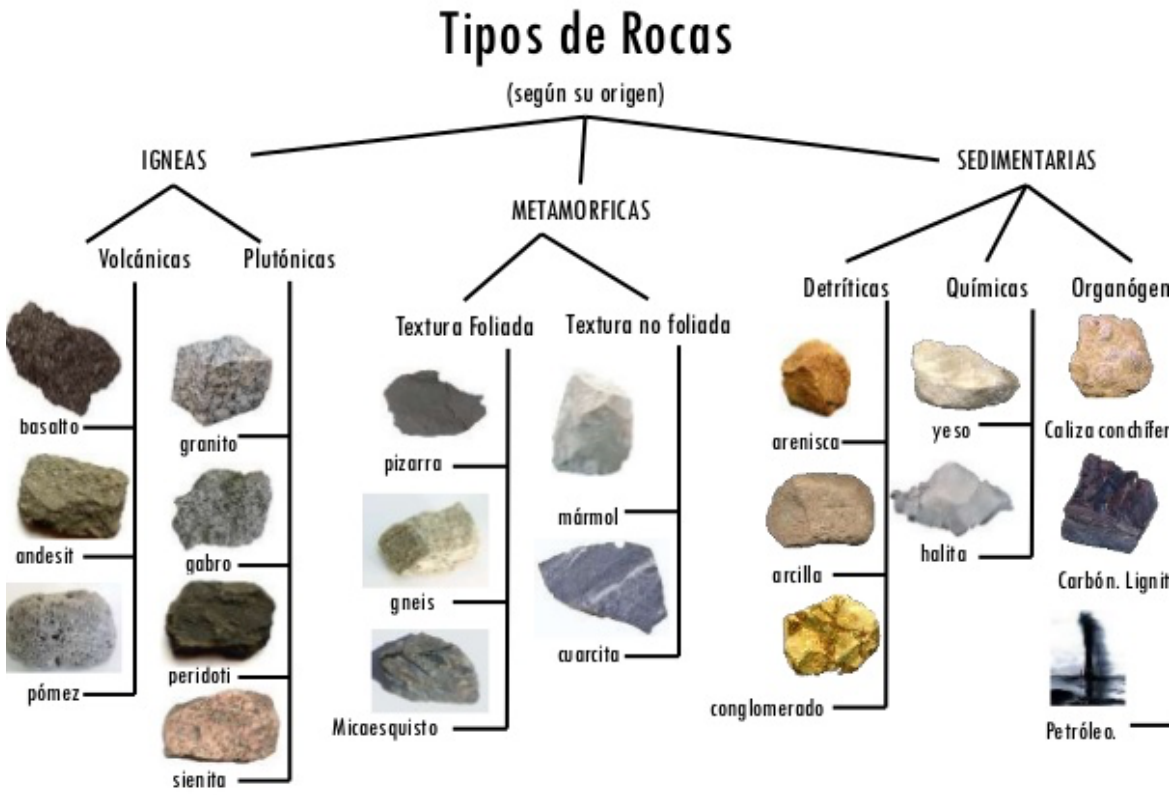



**Figura 1.5. Ejemplos de diversos tipos de rocas.**

Cabe destacar que la clasificación de las rocas puede ser más compleja, ya que dentro de cada grupo existen numerosos tipos y variedades de rocas con características específicas y únicas. El estudio de las rocas es esencial en la geología para comprender la historia geológica de la Tierra y sus procesos geodinámicos.

# MINERALES FORMADORES DE ROCAS

Los minerales formadores de rocas son aquellos minerales que se combinan para constituir la mayoría de las rocas que componen la corteza terrestre. Estos minerales son fundamentales para la formación y clasificación de las rocas y se agrupan en tres categorías principales: minerales ígneos, minerales sedimentarios y minerales metamórficos. A continuación, se mencionan algunos ejemplos representativos de cada grupo:

## *Minerales ígneos:*

Los minerales ígneos se forman a partir del enfriamiento y solidificación del magma. Constituyen la base de las rocas ígneas, que son aquellas formadas por procesos volcánicos o intrusivos en la corteza terrestre. Ejemplos de minerales ígneos incluyen:

- Feldespato (por ejemplo, ortoclasa, plagioclasa)
- Cuarzo
- Mica (por ejemplo, moscovita, biotita)
- Olivino
- Piroxeno (por ejemplo, augita)
- Anfíbol (por ejemplo, hornblenda)

## *Minerales sedimentarios:*

Los minerales sedimentarios son aquellos que se forman a partir de la acumulación y cementación de partículas de roca, fragmentos de minerales o restos de organismos en entornos sedimentarios. Son los principales componentes de las rocas sedimentarias. Algunos ejemplos de minerales sedimentarios son:

- Calcita (principal componente de la roca caliza)
- Arcillas (como la caolinita y la esmectita)
- Cuarzo (también presente en rocas sedimentarias como el arenisca)
- Yeso
- Halita (sal de roca)

## *Minerales metamórficos:*

Los minerales metamórficos son aquellos que se forman debido a la transformación de otros minerales bajo altas presiones y temperaturas en el subsuelo. Constituyen las rocas metamórficas. Algunos ejemplos de minerales metamórficos incluyen:

- Mica (por ejemplo, mica moscovita metamórfica)

- Clorita
- Serpentina
- Grafito
- Garnet (granate)
- Cianita

Es importante mencionar que la variedad de minerales formadores de rocas es mucho mayor, y cada tipo de roca puede estar compuesto por una combinación de varios minerales. Además, los minerales pueden cambiar durante el ciclo geológico debido a los procesos tectónicos y las interacciones con diferentes ambientes geológicos.

## METEORIZACION, EROSION Y TRANSPORTE

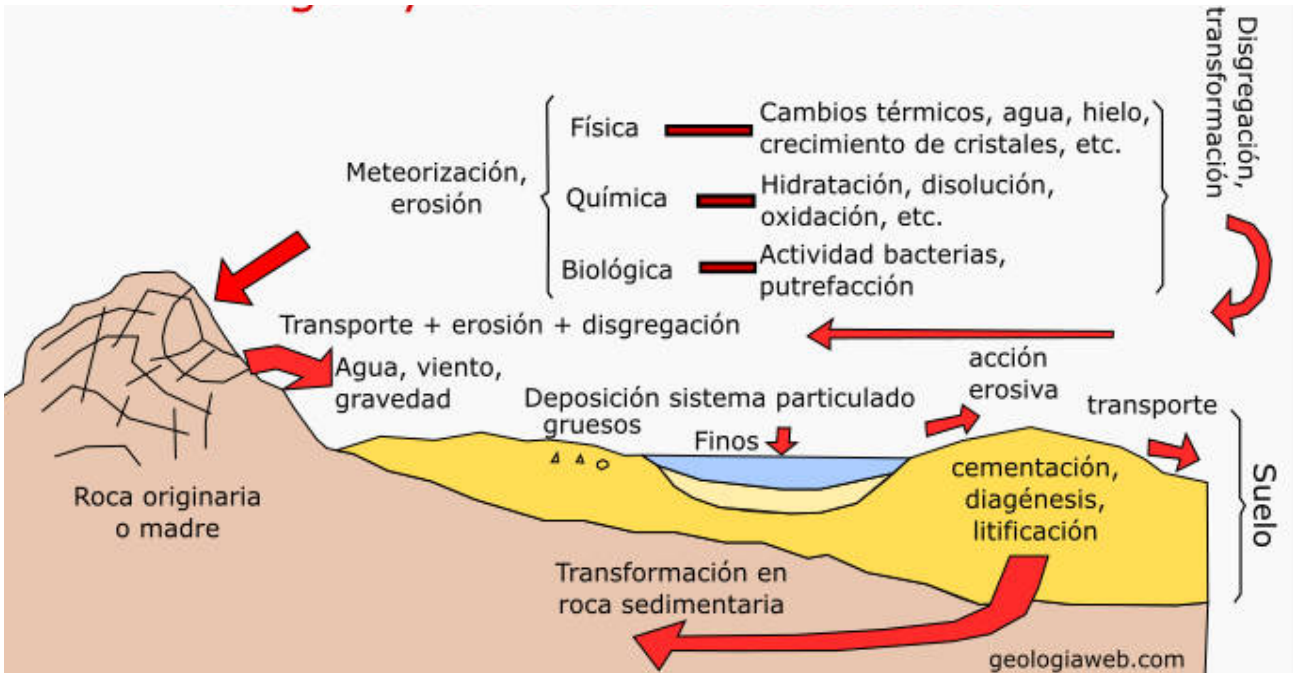



**Figura 1.6. Procesos de meteorizacion, erosion y transporte (Fuente: geologiaweb.com).**

Aquí se describen algunos aspectos clave de la geología relacionados con el origen y formación del suelo:

Roca madre (Material parental): La roca madre es el material geológico subyacente del cual se deriva el suelo. Puede estar compuesta por diferentes tipos de rocas, como rocas ígneas, rocas sedimentarias o rocas metamórficas. La composición mineralógica y la estructura de la roca madre influirán en la mineralogía y las propiedades físicas del suelo resultante.

Meteorización: La meteorización es el proceso geológico por el cual la roca madre se descompone y se fragmenta en partículas más pequeñas debido a la acción de los factores ambientales. Hay dos tipos principales de meteorización:

Meteorización física: Involucra la desintegración mecánica de la roca madre sin alterar su composición química. Factores como cambios de temperatura, heladas, acción de las raíces de las plantas y abrasión por el viento y el agua contribuyen a la meteorización física.

Meteorización química: Implica cambios en la composición química de la roca madre debido a la interacción con agua, gases atmosféricos y otros agentes químicos. Los procesos de hidrólisis, oxidación, carbonatación y otros procesos químicos descomponen la roca madre y liberan minerales y nutrientes que serán fundamentales para el desarrollo del suelo.

Transporte y sedimentación: Una vez que la roca madre se ha descompuesto y fragmentado, los materiales resultantes son transportados por agentes como el agua, el viento o el hielo y se depositan en distintas áreas. Estos sedimentos acumulados darán lugar a la formación de diferentes tipos de suelos, dependiendo de la composición y características del material.

Perfil del suelo: La interacción de los procesos geológicos, climáticos, biológicos y topográficos da lugar a la formación del perfil del suelo, que muestra diferentes horizontes o capas. El horizonte superior (A) generalmente contiene materia orgánica y nutrientes, mientras que el horizonte subsuperficial (B) muestra acumulación de minerales y otros materiales que se han trasladado desde la parte superior del perfil.

En resumen, la geología del origen y formación del suelo implica el estudio de cómo la roca madre se descompone y se transforma a lo largo del tiempo debido a procesos físicos y químicos, dando lugar a la diversidad de suelos que encontramos en la superficie terrestre. Comprender la geología subyacente es esencial para la caracterización y el manejo adecuado de los suelos en diversos contextos, incluyendo proyectos de ingeniería civil, agricultura y conservación del medio ambiente.

## SUELOS RESIDUALES Y TRANSPORTADOS

El suelo residual y el suelo transportado son dos tipos de suelo que difieren en su origen y proceso de formación. Aquí se describen sus características distintivas:

*Suelo residual*

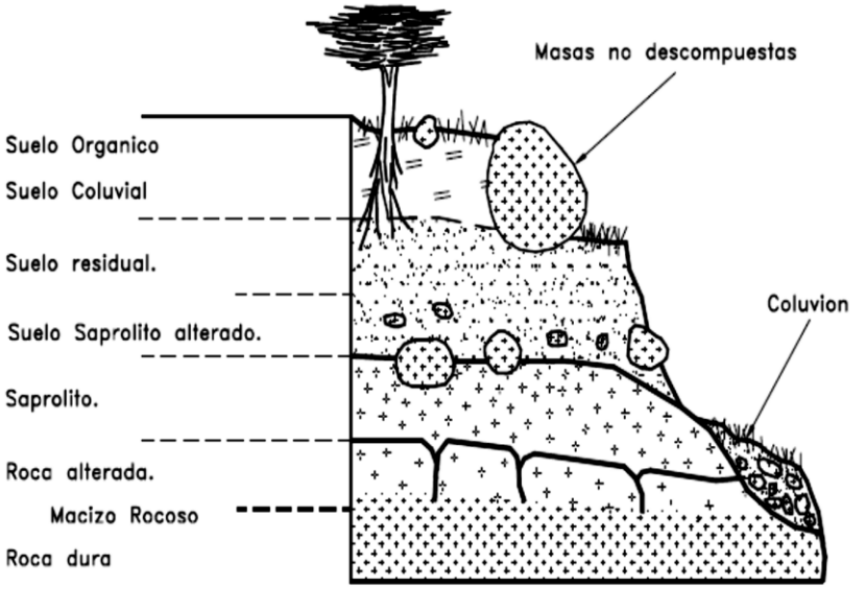



**Figura 1.7. Esquematico de perfil de terreno de suelo residual.**

Origen: El suelo residual se forma in situ, es decir, directamente sobre la roca madre que se encuentra debajo. Se desarrolla a partir de la descomposición y desintegración de la roca madre que está sometida a los procesos de meteorización física y química a lo largo del tiempo.

Proceso de formación: La meteorización actúa sobre la roca madre y la convierte en partículas más pequeñas, modificando su estructura y composición. A medida que el tiempo pasa, se desarrolla una capa de suelo residual sobre la roca madre, y esta capa puede ser más gruesa o más delgada según el grado de meteorización alcanzado.

Ubicación: El suelo residual se encuentra directamente sobre la roca madre y generalmente es más común en zonas con condiciones climáticas estables y poca erosión.

Características: Debido a que se desarrolla in situ, el suelo residual a menudo conserva muchas de las características y minerales de la roca madre original. Su composición mineralógica puede variar según el tipo de roca madre y los procesos de meteorización que haya experimentado.

*Suelo transportado*

**Figura 1.8. Deposito aluvial.**

Origen: El suelo transportado se forma lejos de su roca madre original y se acumula como resultado del transporte y deposición de sedimentos erosionados por diferentes agentes, como agua, viento o hielo.

Proceso de formación: El suelo transportado se origina a partir de la erosión y desgaste de rocas y suelos preexistentes en áreas distantes. Estos materiales son arrastrados por agentes externos y se depositan en lugares alejados de su fuente original. Con el tiempo, estos sedimentos acumulados se compactan y se convierten en suelo.

Ubicación: El suelo transportado se encuentra en áreas donde ha sido transportado por procesos geológicos y se ha depositado lejos de su roca madre original. Esto puede incluir áreas como llanuras aluviales, deltas, dunas de arena y glaciares.

Características: Dado que el suelo transportado proviene de diferentes fuentes, puede mostrar una composición mineralógica y una estructura más variada que el suelo residual. También es probable que contenga materiales transportados, como gravas, arenas y limos, que pueden haber sido arrastrados desde áreas distantes.

En resumen, el suelo residual se forma in situ sobre la roca madre debido a la meteorización en el lugar, mientras que el suelo transportado se origina a partir de sedimentos transportados y depositados lejos de su roca madre original. Ambos tipos de suelo pueden ser importantes en la ingeniería civil y en la agricultura, ya que influyen en las características geotécnicas y agronómicas de un área determinada.

## Tipos de suelos transportados

Los suelos transportados se forman a partir de la erosión y transporte de materiales desde su lugar de origen hacia otras áreas donde se depositan y acumulan. Estos suelos pueden ser clasificados en varios tipos en función de los agentes de transporte y las características del depósito. A continuación, se describen algunos de los tipos de suelos transportados más comunes:

a) Suelos aluviales: Son suelos transportados y depositados por corrientes de agua, como ríos y arroyos. Los suelos aluviales suelen ser bien clasificados, es decir, contienen partículas de diferentes tamaños bien separadas. En las llanuras aluviales, los suelos aluviales pueden ser muy ricos en materia orgánica y nutrientes, lo que los convierte en áreas agrícolas fértiles.
b) Suelos coluviales: Se forman por la acumulación de material transportado por la gravedad desde laderas o pendientes empinadas. Estos suelos son generalmente mal clasificados y contienen una mezcla de diferentes tamaños de partículas, debido a la acción de la gravidad que arrastra los materiales hacia abajo.
c) Suelos glaciales: Son suelos transportados y depositados por glaciares en movimiento. Los glaciares arrastran y erosionan los materiales a medida que avanzan, y al derretirse, dejan depósitos de sedimentos que se conocen como morrenas glaciales. Los suelos glaciales pueden ser muy heterogéneos en términos de tamaño y composición de las partículas.
d) Suelos eólicos (suelos de dunas): Son suelos transportados y depositados por el viento. Los suelos eólicos están formados principalmente por partículas de arena fina a muy fina y, a menudo, se encuentran en forma de dunas en áreas desérticas o en regiones con fuertes vientos.
e) Suelos lacustres: Se forman en los fondos de lagos y otros cuerpos de agua. Los sedimentos transportados por los ríos y otros afluentes se acumulan en los lechos de los lagos y, con el tiempo, pueden convertirse en suelos lacustres. Estos suelos suelen ser ricos en materia orgánica y nutrientes.
f) Suelos glaciolacustres: Son suelos transportados y depositados por el agua derretida proveniente de glaciares. Los sedimentos arrastrados por el agua glaciar se acumulan en lagos glaciares, formando suelos glaciolacustres, que pueden tener una gran variedad de composiciones y características.

Estos son solo algunos ejemplos de los diferentes tipos de suelos transportados que existen en la naturaleza. Cada tipo de suelo transportado tiene características únicas y puede encontrarse en diferentes regiones geográficas según los procesos geológicos y climáticos que los hayan formado. El estudio de estos suelos es importante para comprender su composición y comportamiento, lo que es relevante en aplicaciones agrícolas, ingeniería civil y gestión ambiental.

# RELACIONES DE FASE

En la mecánica de suelos, las relaciones de fase se refieren a la relación entre los tres componentes principales de un suelo: sólidos, agua y aire. Estos componentes interactúan de manera compleja y pueden existir en diferentes estados de saturación y densificación, lo que afecta las propiedades y el comportamiento del suelo. Las relaciones de fase son fundamentales para comprender y analizar el comportamiento de los suelos en diversas aplicaciones geotécnicas.

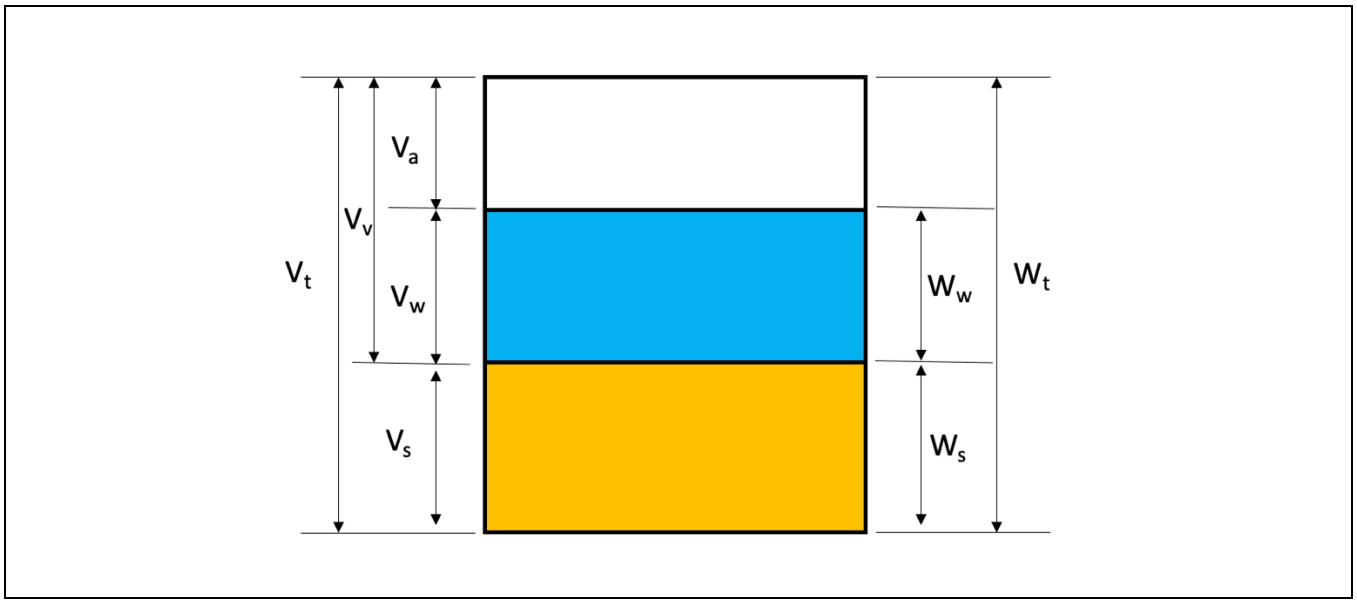



**Figura 1.9. Esquematico de las relaciones de fase en un suelo.**

En el esquema de la Figura 1 se presentan a la derecha los volumenes: el total, el volumen de vacios o huecos ($V_v$) (Conformado a su vez por el volumen de aire (Va) y el volumen de agua ($V_w$)), el volumen de sólidos ($V_s$): de igual manera del lado derecho se indican el peso total ($W_t$), el peso del agua ($W_w$) y el peso de la fase solida ($W_s$).

Estas relaciones de fase son fundamentales para determinar las propiedades geotécnicas de un suelo, como la densidad aparente, la porosidad, la humedad y la compresibilidad. Además, son esenciales para el análisis de la capacidad de carga, la consolidación y la expansión de los suelos en proyectos de ingeniería civil y geotécnica.

Las relaciones de fase mas importantes se describen a continuación.

# Pesos Volumétricos

## *Peso volumétrico total (o de la masa)*

El peso volumétrico de la masa total del suelo $(\gamma_m)$ es el peso total dividido por su volumen total.

$$\gamma_m = \frac{W_t}{V_t}$$

Si el suelo se ecuentra saturado (Grado de Saturación= 100%) se le denomina peso volumétrico saturado ($\gamma_{sat}$). Por lo general el peso volumetrico saturado es alrededor de un 10% mayor al peso volumetrico de la masa para un mismo tipo de suelo. Los valores de pesos volumetricos mas comunes en los suelos son de entre 1700 a 1900 kg/m$^3$ por lo general.

## *Peso volumétrico 'sumergido'*

Un parametro importante en algunos calculos geotecnicos es el 'peso volumetrico sumergido' (o boyante) $(\gamma')$ que resulta de la diferencia entre el peso volumetrico saturado y el peso volumetrico del agua.

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

## *Peso volumétrico 'seco'*

El peso volumetrico seco $(\gamma_d)$ se utiliza en la práctica para principalmente determinar el grado de compactacion de un suelo. Es la relacion que guarda el peso de la parte solida contra el volumen total.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{W_t}$$

## *Densidad de sólidos*

La densidad de solidos o 'gravedad específica' ($S_s$) es una caracteristica propia de cada suelo, que da idea de la composicion mineral del mismo. Es la relacion que guarda la densidad de la parte solida con respecto a la densidad del agua. De esta manera se puede expresar como:

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

O bien,

$$S_s = \frac{W_s}{V_s\,\gamma_w}$$

Los valores de densidad de solidos, como se comentó, son un indicativo de la composicion mineral del suelo y por lo mismo tendran valores que rondaran entre 2.4 y 2.9, dependiendo de las densidades de los minerales contenidos en el mismo.

## RELACIONES FUNDAMENTALES

Algunos parámetros fundamentales del suelo, y que se pueden de obtener de mediciones realizadas a las muestras en el laboratorio son, por ejemplo: el contenido de humedad (%w), el grado de saturación (%Gw).la relacion de vacios (e), y la porosidad (n), A continuación se describirán a detalle.

### *Contenido de humedad (%w)*

El contenido de humedad relaciona la cantidad de agua en la muestra contra el peso de la parte solida de la misma, se expresa en porcentaje.

$$\%w = \frac{W_w}{W_s} x\ 100$$

### *Grado de Saturación (%$G_w$)*

El grado de saturacion indica la cantidad de agua contenida en el volumen de huecos de un suelo, y tambien se expresa en porcentaje.

$$\%G_w = \frac{V_w}{V_v} x\ 100$$

Cabe mencionar que %$G_w$ sera de un rango de cero (suelo seco) a 100% (Suelo saturado) y que no es lo mismo que el contenido de humedad de la muestra, la cual es una relacion de pesos, no de volumenes.

### *Relación de vacíos (e)*

La relacion de vacios (e) es una proporción muy utilizada en diferentes calculos geotécnicos como en calculo de asentamientos y en compactacion, por ejemplo. Es la proporcion de volumen de huecos con respecto al volumen de solidos del suelo. Se expresa en decimales.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

## *Porosidad (n)*

La porosidad (n) es la proporcion que guarda el volumen de huecos del material contra el volumen *total* del mismo.

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

Las características definidas en esta sección son de amplia utilidad en geotecnia y a la vez, de la relacion entre ellas se pueden obtener expresiones sustitutas en caso de no contar con el valor de alguno de ellos, poniendolo en funcion de los valores conocidos. Para esto solo es cuestion de operar en el diagrama de fase (de la Figura 1) sustituyendo los valores conocidos y utilizando las ecuaciones descritas aquí.

# ACTIVIDADES PROPUESTAS

I. RESPONDER BREVEMENTE LOS SIGUIENTES CUESTIONAMIENTOS

a. ¿Qué es el suelo?
b. ¿Cuáles son los componentes del suelo?
c. ¿Cómo se forma el suelo?
d. ¿Cuáles son los factores que influyen en la formación del suelo?
e. ¿Qué es la meteorización?
f. ¿Cuáles son los tipos de meteorización?
g. ¿Qué es la erosión?
h. ¿Cuáles son los tipos de erosión?
i. ¿Qué es la sedimentación?
j. ¿Cuáles son los tipos de sedimentación?
k. Relacionar los tipos de suelos sedimentarios con su metodo de depositacion.

II. ENUMERE Y DESCRIBA AL MENOS TRES TIPOS DE CONSTRUCCION DONDE HAYA VISTO QUE LA MECANICA DE SUELOS (O ING. GEOTECNICA) SE PUEDEN RECONOCER DENTRO DE LOS TRABAJOS DE LA ING. CIVIL

# CLASIFICACION DE SUELOS

## ANALISIS GRANULOMÉTRICO

El análisis granulométrico de suelos es una técnica utilizada para determinar la distribución de tamaños de partículas en una muestra de suelo. Esta información es esencial para comprender las características y el comportamiento del suelo, así como para clasificarlo adecuadamente según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) o el sistema de clasificación de suelos AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

El análisis granulométrico se realiza mediante el tamizado y la sedimentación de las partículas del suelo. A continuación, se describe el procedimiento general para llevar a cabo un análisis granulométrico:

Preparación de la muestra: Se toma una muestra representativa del suelo y se elimina cualquier materia orgánica o material no deseado.

Secado de la muestra: La muestra se seca en un horno a una temperatura controlada hasta que alcance un peso constante. Esto asegura que la humedad de la muestra se haya eliminado por completo.

Tamizado: La muestra se pasa a través de una serie de tamices de diferentes tamaños de malla. Los tamices se apilan en orden ascendente de tamaño de abertura, y la muestra se coloca en el tamiz superior.

Agitación: Los tamices se agitan o se someten a movimientos de vaivén para separar las partículas del suelo en diferentes fracciones según su tamaño.

Pesar las fracciones: Después de la agitación, se retiran los tamices y se pesan las fracciones de suelo retenidas en cada tamiz.

Cálculo de porcentajes: Se calcula el porcentaje de masa retenida en cada tamiz en relación con la masa total de la muestra. También se calcula el porcentaje de masa que pasa a través de cada tamiz.

Representación gráfica: Los resultados del análisis granulométrico se representan en un gráfico llamado curva granulométrica, que muestra la distribución del tamaño de partículas en función del tamaño de las aberturas de los tamices.

**Figura 3.1. Material y equipo para prueba de cribado.**

La curva granulométrica proporciona información valiosa sobre la cantidad de partículas de diferentes tamaños presentes en el suelo, lo que es esencial para evaluar sus características de drenaje, compactabilidad, permeabilidad y comportamiento ante diferentes fuerzas y cargas. Este análisis es fundamental en la ingeniería geotécnica para la selección y diseño adecuado de materiales de construcción, como agregados y suelos, así como para el diseño de mezclas de suelo estabilizado y otras aplicaciones ingenieriles.

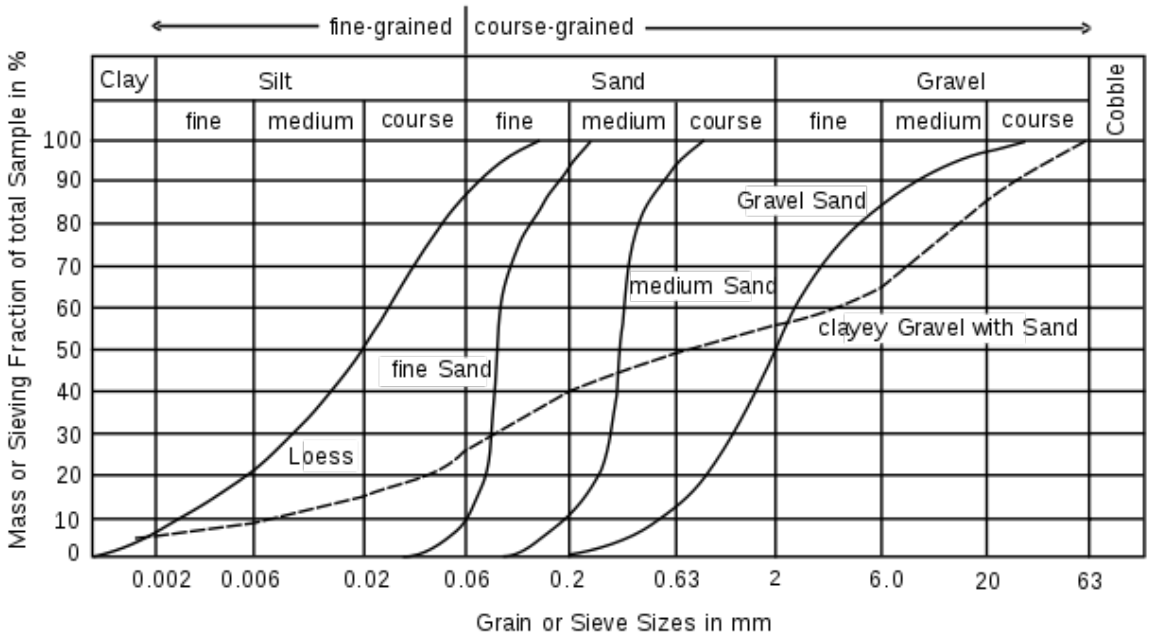



**Figura 3.2. Curvas granulométricas para diversos tipos de suelos (Aclaración: Estandar Eurocode).**

# Prueba del Hidrómetro

**Figura 3.3. Equipo para la prueba del hidrómetro.**

El análisis granulométrico con hidrómetro es una técnica utilizada para determinar la distribución de tamaños de partículas en suelos finos, principalmente limos y arcillas. A diferencia del análisis granulométrico por tamizado, que es más adecuado para suelos gruesos (grava y arena), el análisis con hidrómetro es apropiado para suelos con partículas más pequeñas que no se pueden separar eficientemente por tamizado.

El procedimiento para realizar el análisis granulométrico con hidrómetro es el siguiente:

Preparación de la muestra: Se toma una muestra representativa del suelo fino y se elimina cualquier materia orgánica o material no deseado. Luego, la muestra se seca en un horno a una temperatura controlada para eliminar la humedad.

Preparación de la suspensión: Se mezcla una cantidad de suelo seco con agua en un matraz, creando una suspensión. La suspensión se agita vigorosamente para asegurar una distribución homogénea de las partículas.

Sedimentación: Después de la agitación, la suspensión se vierte en un cilindro de sedimentación conocido como "pipeta de sedimentación". El hidrómetro, que es un instrumento similar a un termómetro con una bola de vidrio en la parte inferior, se coloca en la pipeta.

Medición de la densidad del líquido: Se mide la densidad del líquido en el hidrómetro, lo que proporciona una lectura inicial.

Medición del tiempo de sedimentación: Se registra el tiempo que tarda el hidrómetro en sedimentar una cierta distancia a través de la suspensión.

Cálculo del porcentaje de partículas en suspensión: Utilizando la densidad del líquido, el tiempo de sedimentación y datos específicos de la pipeta de sedimentación, se calcula el porcentaje de partículas en suspensión de diferentes tamaños.

Representación gráfica: Los resultados del análisis con hidrómetro se representan en una curva granulométrica, que muestra la distribución de tamaños de partículas en función del porcentaje de partículas en suspensión.

El análisis granulométrico con hidrómetro es valioso para caracterizar suelos finos y comprender sus propiedades de comportamiento, como la capacidad de retención de agua y la plasticidad. Esta información es crucial en la ingeniería geotécnica y en la preparación de mezclas para diferentes aplicaciones, como la estabilización de suelos o la determinación de propiedades de filtración y permeabilidad.

## Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg son un conjunto de tres límites que se utilizan en la mecánica de suelos para determinar las propiedades de plasticidad y el comportamiento del suelo en relación con la humedad. Estos límites llevan el nombre del científico sueco Albert Atterberg, quien los desarrolló a principios del siglo XX. Los tres límites de Atterberg son:

Límite Líquido (LL): El límite líquido es el contenido de humedad en el suelo en el cual una muestra de suelo cambia de un estado semilíquido a un estado plástico. Se determina utilizando el aparato de Casagrande y se expresa en porcentaje. El límite líquido es un indicador de la plasticidad del suelo y es utilizado en la clasificación de suelos según el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS).

Límite Plástico (LP): El límite plástico es el contenido de humedad en el suelo en el cual una muestra de suelo se comporta como un material plástico y se puede moldear en una forma específica sin romperse. Se determina mediante el método del rodillo y se expresa también en porcentaje. El límite plástico junto con el límite líquido se utiliza para calcular el índice de plasticidad (IP).

Límite de Contracción (LC) o Límite de Secado (LS): El límite de contracción es el contenido de humedad en el suelo en el cual una muestra de suelo ya no se contrae más al secarse. En algunos países, se le denomina límite de secado, y se determina sometiendo la muestra a un proceso de secado y medir el cambio de volumen.

(a)

(b)

**Figura 3.4. (a) Copa de Casagrande para determinar LL; (b) Procedimiento para obtener LP.**

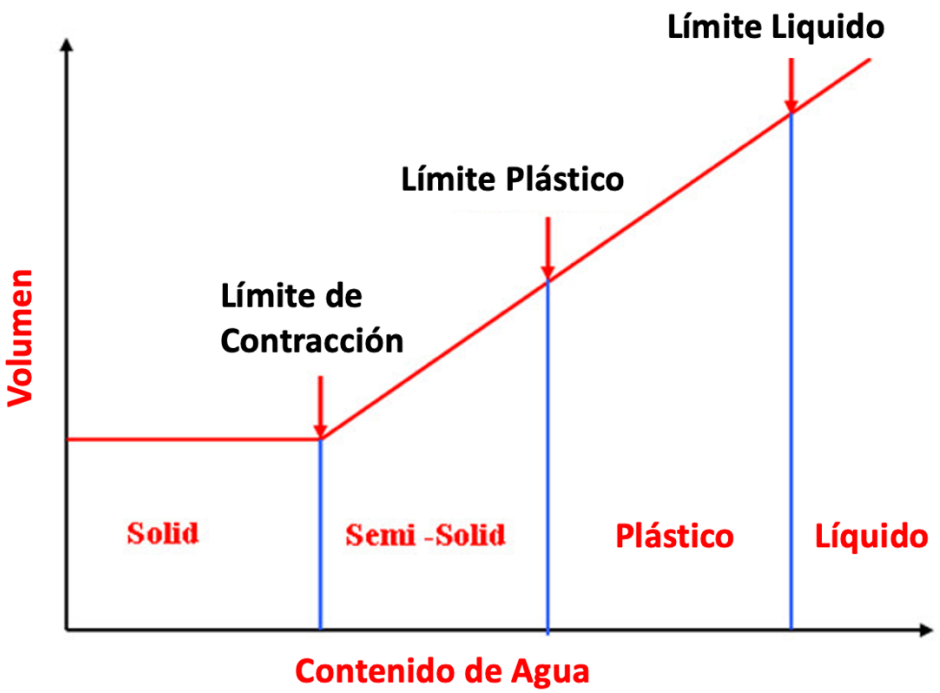



**Figura 3.5. Esquemático representando las fases del suelo vs. contenido de humedad.**

Con estos límites, es posible determinar el intervalo de contenido de humedad en el que un suelo presenta propiedades plásticas y el intervalo en el que muestra comportamiento frágil o quebradizo. Estos límites son de gran importancia en la ingeniería geotécnica para caracterizar los suelos, predecir su comportamiento ante las variaciones de humedad y diseñar cimentaciones y estructuras adecuadas para evitar problemas como la retracción y la expansión excesiva del suelo.

## Límites de Consistencia para clasificación de suelos

El límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad son tres propiedades importantes de los suelos que se utilizan para evaluar su comportamiento y plasticidad. A continuación, se describen cada uno de ellos:

Límite Líquido (LL): El límite líquido es el contenido de humedad en el suelo en el cual una muestra de suelo pasa de un estado semilíquido a un estado plástico. Se determina mediante la prueba del límite líquido utilizando el aparato de Casagrande. El contenido de humedad en este punto se registra como el límite líquido y se expresa en porcentaje. Es una medida de la plasticidad del suelo y es un parámetro importante para clasificar los suelos.

Límite Plástico (LP): El límite plástico es el contenido de humedad en el suelo en el cual una muestra de suelo se comporta como un material plástico y se puede moldear en una forma específica sin romperse. Se determina mediante el método del rodillo. El contenido de humedad en este punto se registra como el límite plástico y también se expresa en porcentaje.

Índice de Plasticidad (IP): El índice de plasticidad es una medida de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo. Se calcula restando el límite plástico (LP) del límite líquido (LL):

$$IP=LL-LP$$

El índice de plasticidad es un valor numérico que indica la plasticidad del suelo, es decir, su capacidad de deformarse sin romperse cuando se le agrega o se le extrae agua. Si el índice de plasticidad es alto, el suelo tiene una mayor plasticidad y tiende a experimentar cambios volumétricos significativos con variaciones en el contenido de agua. Por otro lado, si el índice de plasticidad es bajo, el suelo es menos plástico y es menos susceptible a cambios volumétricos por variaciones en la humedad.

Estas tres propiedades son fundamentales en la caracterización de los suelos para el diseño y construcción de obras geotécnicas, como cimentaciones, terraplenes y estructuras, ya que influyen en el comportamiento y la estabilidad del suelo bajo diferentes condiciones de carga y humedad. Además, el límite líquido y el límite plástico son utilizados en la clasificación de suelos según los sistemas de clasificación, como el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) o el sistema de clasificación de suelos AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

## Sistema de Clasificación SUCS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS, por sus siglas en inglés) es un sistema de clasificación ampliamente utilizado para categorizar y describir los diferentes tipos de suelos y rocas encontrados en ingeniería geotécnica y proyectos de construcción. Fue desarrollado conjuntamente por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) y el Buró de Carreteras Federales (FHWA) para proporcionar un enfoque común y uniforme en la identificación de suelos y rocas en proyectos de ingeniería civil y carreteras.

El USCS clasifica los suelos y rocas en función de sus propiedades y características, como la distribución del tamaño de las partículas, los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico), el contenido de partículas finas, entre otros. Cada tipo de suelo o roca se designa mediante una notación alfanumérica que consiste en dos letras y, en algunos casos, un símbolo adicional.

Las principales letras utilizadas en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos son:

Símbolos de grupo:

- G: Grava
- S: Arena
- M: Limos
- C: Arcillas

Letras adicionales que indican características específicas:

- P: Suelos orgánicos o compuestos por material orgánico.
- W: Suelos con cantidades significativas de agua.
- H: Suelos con alto contenido de humedad y con propiedades expansivas.

Números que indican el porcentaje de partículas finas en el suelo:

- 0: Menos del 5% de partículas finas.
- 1: Entre el 5% y 12% de partículas finas.
- 2: Entre el 12% y 50% de partículas finas.
- 3: Más del 50% de partículas finas.

Por ejemplo, algunos ejemplos de designaciones de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos son:

- GP: Grava bien graduada

- CL: Arcilla de baja compresibilidad
- SM: Arena limosa
- OL: Suelo orgánico

Esta notación proporciona información importante sobre las características y el comportamiento del suelo, lo que permite a los ingenieros y geotécnicos tomar decisiones informadas sobre el diseño y la construcción de proyectos de ingeniería que involucren suelos y rocas. Es una herramienta valiosa en la ingeniería geotécnica para la clasificación y la descripción uniforme de los materiales del suelo.

## Clasificación de Suelos Gruesos

Los suelos gruesos son aquellos que tienen una alta proporción de partículas más grandes, como grava y arena, en comparación con las partículas finas (limo y arcilla). La clasificación de suelos gruesos se realiza utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), que utiliza una notación alfanumérica para designar cada tipo de suelo. Las principales letras utilizadas para clasificar los suelos gruesos son:

Símbolos de grupo para suelos gruesos:

- G: Grava
- S: Arena

Letras adicionales que indican características específicas:

- W: Suelos con cantidades significativas de agua.
- P: Suelos orgánicos o compuestos por material orgánico.

Números que indican el porcentaje de partículas finas en el suelo:

- 0: Menos del 5% de partículas finas.
- 1: Entre el 5% y 12% de partículas finas.
- 2: Entre el 12% y 50% de partículas finas.

Basándonos en esta notación, algunas clasificaciones de suelos gruesos comunes son:

- GP: Grava bien graduada: Suelo grueso compuesto principalmente de grava, con una amplia distribución de tamaños de partículas y bien graduado entre los diferentes tamaños.
- GW: Grava bien graduada con cantidades significativas de agua.

- SW: Arena bien graduada: Suelo grueso compuesto principalmente de arena, con una amplia distribución de tamaños de partículas y bien graduado entre los diferentes tamaños.
- SP: Arena bien graduada con cantidades significativas de agua.

Es importante tener en cuenta que la clasificación de suelos también puede incluir símbolos adicionales para indicar propiedades específicas, como las letras H para suelos expansivos o las letras M para suelos limosos mezclados con grava o arena.

La clasificación de suelos gruesos proporciona información relevante sobre las características y el comportamiento del suelo, lo que es esencial para el diseño y la construcción de cimentaciones, terraplenes, carreteras y otras obras de ingeniería que involucren este tipo de suelos. Los ingenieros geotécnicos utilizan esta clasificación para tomar decisiones informadas y asegurar la estabilidad y el éxito de los proyectos de ingeniería civil.

## Clasificación de Suelos Finos

Los suelos finos son aquellos que contienen una alta proporción de partículas más pequeñas, como limo y arcilla, en comparación con las partículas más grandes, como grava y arena. La clasificación de suelos finos se realiza utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), que utiliza una notación alfanumérica para designar cada tipo de suelo. Las principales letras utilizadas para clasificar los suelos finos son:

Símbolos de grupo para suelos finos:

- M: Limos
- C: Arcillas

Letras adicionales que indican características específicas:

- O: Suelos orgánicos o compuestos por material orgánico.
- W: Suelos con cantidades significativas de agua.

Números que indican el porcentaje de partículas finas en el suelo:

- 0: Menos del 5% de partículas gruesas (grava y arena).
- 1: Entre el 5% y 12% de partículas gruesas.
- 2: Entre el 12% y 50% de partículas gruesas.

Basándonos en esta notación, algunas clasificaciones de suelos finos comunes son:

- CL: Arcilla de baja compresibilidad: Suelo fino compuesto principalmente de arcilla, que muestra una baja compresibilidad y resistencia al corte.
- CH: Arcilla de alta compresibilidad: Suelo fino compuesto principalmente de arcilla, que muestra una alta compresibilidad y resistencia al corte.
- ML: Limo inorgánico: Suelo fino compuesto principalmente de limo inorgánico.
- OL: Suelo orgánico: Suelo fino compuesto principalmente de material orgánico.

Es importante tener en cuenta que la clasificación de suelos finos también puede incluir símbolos adicionales para indicar propiedades específicas, como las letras H para suelos expansivos o las letras G o S para indicar la presencia de cantidades significativas de grava o arena.

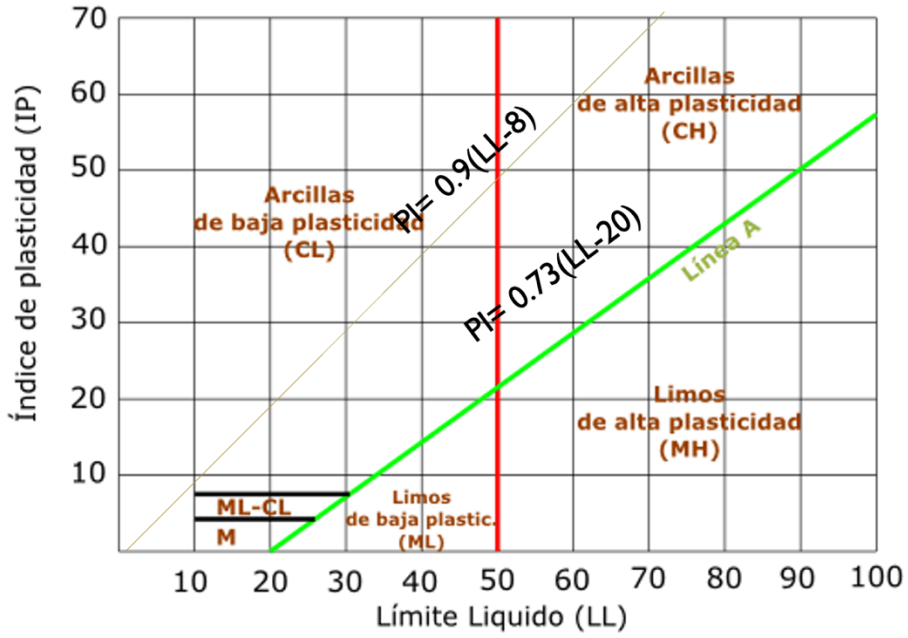



**Figura4.6 Carta de Plasticidad del SUCS.**

# COMPACTACIÓN

La compactación de suelos es un proceso de ingeniería que implica aumentar la densidad y resistencia de un suelo mediante la aplicación de fuerza. Se realiza con el propósito de mejorar las propiedades del suelo para soportar cargas, reducir el asentamiento, aumentar la estabilidad y disminuir la permeabilidad. Es un procedimiento común en la construcción de carreteras, pistas de aterrizaje, cimentaciones de edificios, represas y otras estructuras.

La compactación es necesaria porque, en su estado natural, muchos suelos tienen una baja densidad y están compuestos por partículas sueltas con espacios de aire entre ellas. Estos espacios de aire pueden reducir la capacidad del suelo para soportar cargas y pueden conducir a asentamientos inesperados bajo las cargas aplicadas.

El proceso de compactación generalmente se realiza utilizando equipos mecánicos llamados compactadores, que aplican fuerza sobre el suelo para reducir los espacios de aire y aumentar la densidad. Los tipos comunes de compactadores incluyen:

a) Compactadores de rodillo vibratorio: Son los más utilizados y vienen en diferentes tamaños y configuraciones. Los rodillos vibrantes generan vibraciones para asentar y compactar el suelo.
b) Compactadores de placa: Son compactadores más pequeños y portátiles, ideales para áreas de difícil acceso o de tamaño reducido.
c) Compactadores neumáticos: Utilizan ruedas neumáticas para aplicar presión sobre el suelo y son adecuados para suelos cohesivos.
d) Compactadores de pata de cabra o de pisón: Utilizan un pisón para aplicar fuerza puntualmente, adecuado para suelos más duros y cohesivos.

Antes de realizar la compactación, es esencial realizar pruebas de densidad y humedad del suelo para determinar el nivel de compactación requerido y asegurar que se cumplan las especificaciones del proyecto. Una compactación insuficiente puede resultar en problemas estructurales, mientras que una compactación excesiva también puede ser perjudicial.

Es importante destacar que no todos los suelos son adecuados para la compactación. Algunos suelos, como los expansivos o los altamente orgánicos, pueden no responder bien al proceso de compactación o incluso sufrir daños. Por lo tanto, un análisis detallado del suelo y una planificación adecuada son esenciales antes de emprender cualquier trabajo de compactación.

# PRUEBA PROCTOR

La Prueba Proctor, también conocida como Ensayo Proctor o Prueba de Compactación Proctor, es un procedimiento estándar utilizado en ingeniería civil y geotécnica para determinar la densidad óptima de un suelo y su contenido de humedad óptimo para fines de compactación. Esta prueba lleva el nombre de su inventor, Ralph R. Proctor, quien desarrolló el método en la década de 1930.

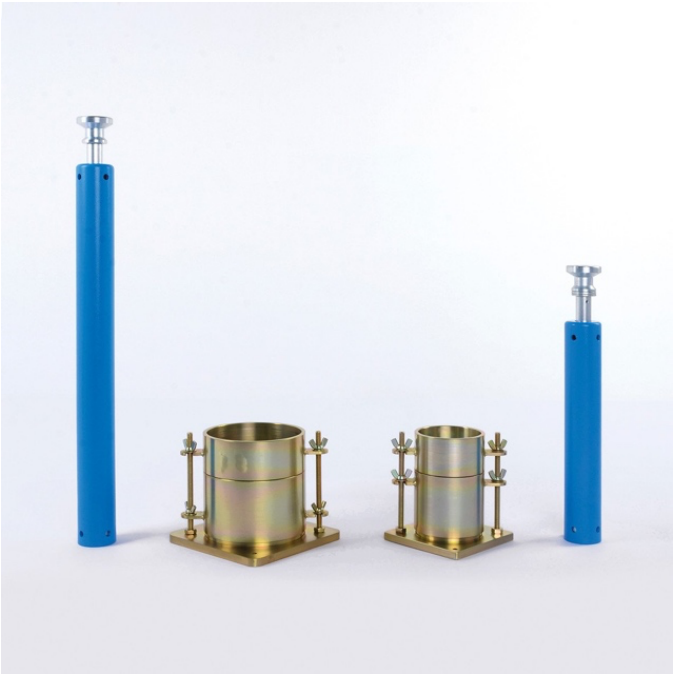


**Figura 4.1. Equipo para las pruebas Proctor Estándar y Proctor Modificada.**

El objetivo principal de la Prueba Proctor es determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo mediante la compactación controlada en el laboratorio. El resultado proporciona una curva característica de densidad en función del contenido de humedad, y a partir de esta curva, se puede seleccionar el contenido de humedad que brinda la máxima densidad del suelo.

A continuación, se describen los pasos básicos para realizar la Prueba Proctor:

Muestra representativa del suelo: Se toma una muestra representativa del suelo en el sitio donde se realizará la compactación. La muestra se recoge a diferentes profundidades para obtener una representación adecuada del suelo en esa área.

Preparación de la muestra: La muestra se somete a un proceso de tamizado para eliminar piedras o partículas grandes y se mezcla para homogeneizarla.

Determinación del contenido de humedad inicial: Se toma una muestra de suelo y se pesa. Luego, se seca en un horno a una temperatura constante para eliminar toda la humedad. La diferencia entre el peso inicial y el peso después del secado se utiliza para determinar el contenido de humedad inicial del suelo.

Preparación de muestras con diferentes contenidos de humedad: Se dividen las muestras en diferentes porciones y se agregan diferentes cantidades de agua para obtener muestras con diferentes contenidos de humedad.

Ensayo de compactación: Cada muestra con diferente contenido de humedad se coloca en una cápsula de compactación y se compacta en capas mediante un pisón o un compactador en el laboratorio. Se registran las masas de suelo compactado y se miden las densidades.

Curva Proctor: Con los resultados de las diferentes pruebas, se traza una curva que muestra la densidad en función del contenido de humedad.

Determinación del contenido de humedad óptimo y la densidad máxima: A partir de la curva Proctor, se identifica el contenido de humedad que proporciona la máxima densidad del suelo, que se considera el contenido de humedad óptimo para la compactación.

Este contenido de humedad óptimo se utiliza como guía durante la compactación en el campo para obtener la máxima densidad y, por lo tanto, la mayor resistencia y estabilidad del suelo. Cabe mencionar que las condiciones de campo pueden diferir de las del laboratorio, por lo que es importante adaptar el contenido de humedad según las condiciones específicas del sitio.

## PRUEBA PROCTOR ESTANDAR Y PROCTOR MODIFICADA

La Prueba Proctor estándar y la Prueba Proctor modificada son dos variantes del mismo ensayo utilizado para determinar la densidad óptima y el contenido de humedad óptimo para la compactación de suelos. Ambas pruebas se utilizan ampliamente en la ingeniería civil y geotécnica, pero difieren en algunos aspectos técnicos y en los resultados que proporcionan.

A continuación, se presentan las principales diferencias entre la Prueba Proctor estándar y la Prueba Proctor modificada:

1) Tamaño y energía del pisón: Una de las principales diferencias radica en el tamaño y la energía del pisón utilizado durante el ensayo de compactación. En la Prueba Proctor estándar, se utiliza un pisón de masa de 2.5 kg y una altura de caída de 30.5 cm. En cambio, en la Prueba Proctor modificada, se emplea un pisón más grande, con una masa de 4.54 kg y una altura de caída de 45.7 cm.
2) Número de capas de compactación: En la Prueba Proctor estándar, se compacta el suelo en tres capas, con 25 golpes de pisón por capa. Mientras tanto, en la Prueba Proctor modificada, también se compacta el suelo en tres capas, pero cada capa se somete a 25 golpes de pisón en un lado y 25 golpes adicionales en el otro lado, lo que suma un total de 50 golpes por capa.
3) Densidades obtenidas: Debido a las diferencias en el tamaño y energía del pisón, la Prueba Proctor modificada generalmente produce una mayor densidad máxima del suelo en comparación con la Prueba Proctor estándar. Esto significa que, en la Prueba Proctor modificada, se logra una mayor compacidad del suelo bajo las mismas condiciones de contenido de humedad.
4) Aplicación: La Prueba Proctor estándar se utiliza principalmente para suelos cohesivos o arcillosos, mientras que la Prueba Proctor modificada es más adecuada para suelos granulares o no cohesivos, como arenas y gravas.

En resumen, la elección entre la Prueba Proctor estándar y la Prueba Proctor modificada dependerá del tipo de suelo a compactar y las especificaciones del proyecto. Ambas pruebas son valiosas herramientas para determinar los parámetros de compactación óptimos y garantizar la adecuada preparación del suelo para proyectos de ingeniería.

## HUMEDAD OPTIMA Y DENSIDAD SECA MAXIMA

En el ensayo Proctor, se determina la humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo mediante la construcción de la curva de compactación, que muestra la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca del suelo compactado. Estos valores son esenciales para la compactación adecuada del suelo en proyectos de ingeniería civil y geotécnica.

### *Humedad óptima:*

La humedad óptima es el contenido de humedad del suelo que proporciona la máxima densidad seca durante el ensayo Proctor. Es el punto en la curva de compactación donde se alcanza la densidad máxima del suelo. La humedad óptima se representa en porcentaje y se encuentra en el eje horizontal

(eje X) de la curva de compactación. Cuando se compacta el suelo a la humedad óptima, se logra la máxima compacidad y resistencia del suelo, lo que mejora su capacidad para soportar cargas y minimizar asentamientos.

## *Densidad seca máxima:*

La densidad seca máxima es la máxima densidad alcanzada por el suelo durante el ensayo Proctor. Se refiere al peso del suelo compactado por unidad de volumen en estado seco. La densidad seca máxima se representa en el eje vertical (eje Y) de la curva de compactación. Este valor corresponde al punto más alto de la curva y se obtiene cuando el contenido de humedad del suelo es el óptimo.

En la curva de compactación, la humedad óptima y la densidad seca máxima están relacionadas, y el contenido de humedad óptimo que proporciona la máxima densidad seca se utiliza como guía durante la compactación en el campo para lograr la mayor densidad posible y, por lo tanto, la mayor resistencia y estabilidad del suelo.

Es importante destacar que la humedad óptima y la densidad seca máxima varían según el tipo de suelo y sus propiedades, por lo que cada proyecto requerirá una prueba Proctor específica para determinar estos valores para el suelo que se utilizará en la construcción. Estos parámetros son fundamentales para garantizar una adecuada preparación del suelo y la calidad del trabajo en proyectos de ingeniería civil.

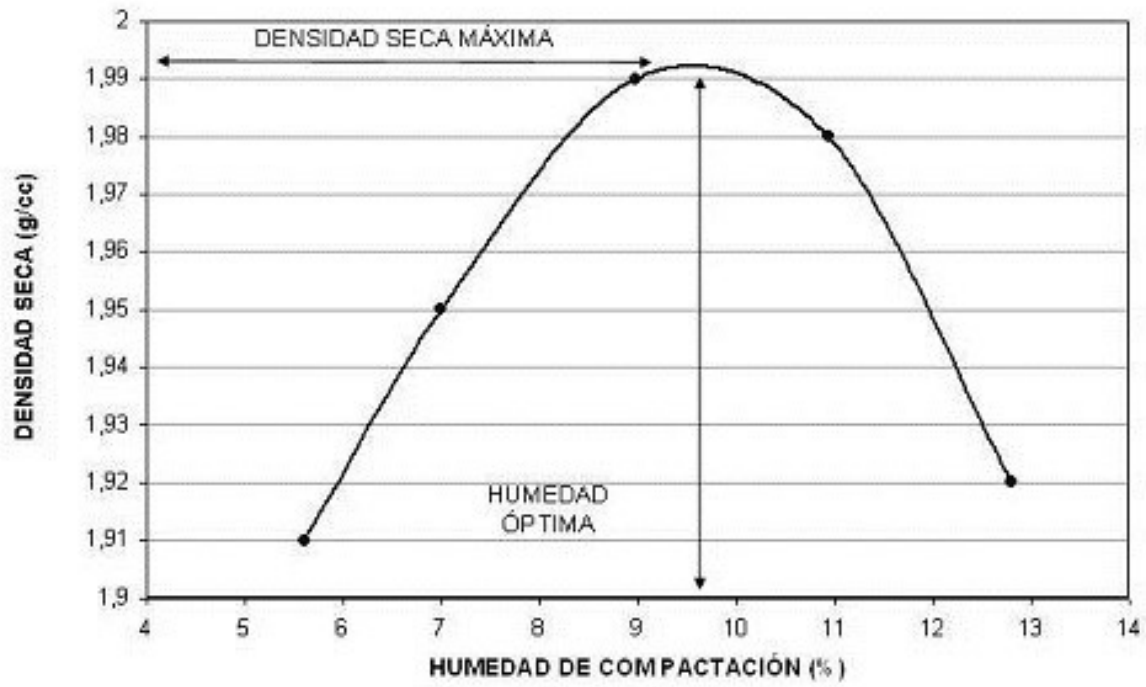



**Figura 4.2. Curva de compactación típica.**

## CURVA DE COMPACTACION Y LINEA DE CERO VACIOS

Las curvas de compactación y de cero vacíos son dos conceptos relacionados con el ensayo Proctor o ensayo de compactación de suelos. Ambas curvas son representaciones gráficas que se obtienen a partir de los resultados de este ensayo y son de gran importancia en la ingeniería geotécnica. A continuación, explicaré cada una de ellas:

### *Curva de Compactación:*

La curva de compactación, también conocida como curva Proctor, es una representación gráfica que muestra la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca del suelo compactado durante el ensayo Proctor. En el ensayo Proctor, se compactan muestras de suelo a diferentes niveles de contenido de humedad y se mide la densidad seca resultante. Estos datos se utilizan para trazar la curva, con el contenido de humedad en el eje horizontal y la densidad seca en el eje vertical.

La curva de compactación tiene una forma característica de "campana" y muestra que la densidad seca del suelo aumenta a medida que se incrementa el contenido de humedad, alcanza un máximo y

luego disminuye a medida que se sigue añadiendo agua al suelo. El punto más alto de la curva representa la densidad máxima del suelo, que corresponde al contenido de humedad óptimo. Este contenido de humedad óptimo es el valor que se debe alcanzar durante la compactación en el campo para lograr la máxima densidad y, por lo tanto, la mayor resistencia y estabilidad del suelo.

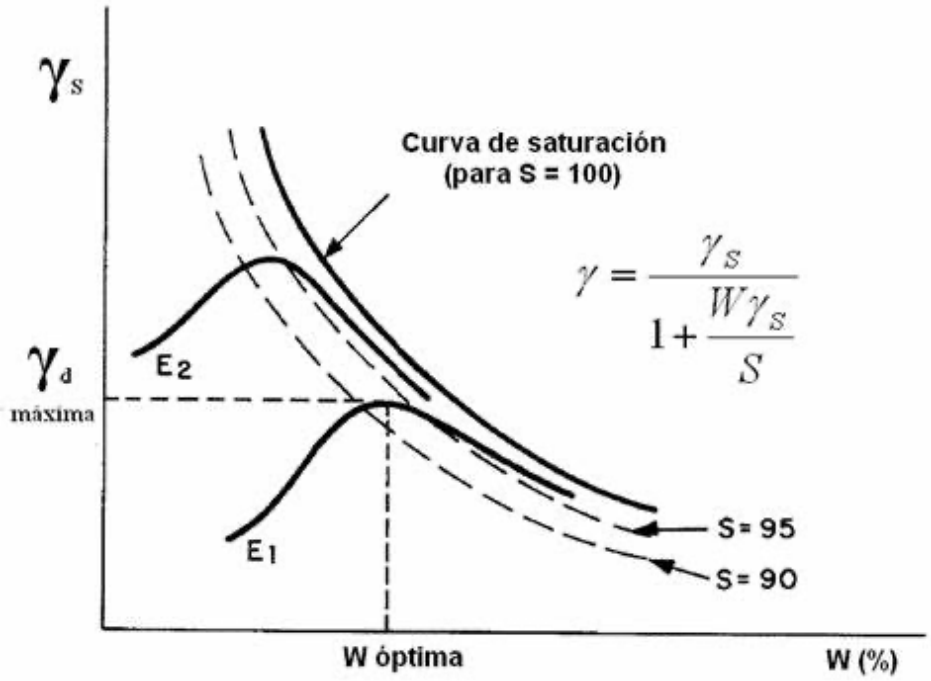



**Figura 4.3. Curvas de compactación y su relación con la línea de saturación.**

## *Curva de Cero Vacíos:*

La curva de cero vacíos, también conocida como curva de cero aire o curva de cero poros, es otra representación gráfica derivada del ensayo Proctor. Esta curva muestra la relación entre el contenido de humedad y el índice de vacíos del suelo compactado.

El índice de vacíos es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen sólido del suelo. Cuando el suelo está compactado en su máxima densidad, el índice de vacíos es igual a cero, lo que significa que no hay vacíos o aire presente en el suelo. Por lo tanto, la curva de cero vacíos comienza en cero cuando el contenido de humedad es igual al contenido de humedad óptimo obtenido de la curva de compactación.

En resumen, la curva de compactación muestra cómo varía la densidad seca del suelo en función del contenido de humedad, mientras que la curva de cero vacíos indica cómo cambia el índice de vacíos con el contenido de humedad. Ambas curvas son herramientas esenciales en ingeniería geotécnica para diseñar y controlar la compactación adecuada de los suelos utilizados en proyectos de construcción.

# PERMEABILIDAD EN SUELOS

La permeabilidad en suelos se refiere a la capacidad del suelo para permitir el flujo de agua a través de él. Es una propiedad hidráulica importante que influye en el comportamiento y la respuesta del suelo ante la presencia de agua. La permeabilidad es una propiedad clave en la ingeniería geotécnica y es especialmente relevante en proyectos de construcción y diseño de obras que involucren suelos, como cimentaciones, presas, carreteras, sistemas de drenaje, entre otros.

La permeabilidad de un suelo depende de varios factores, incluyendo el tamaño y la distribución de las partículas del suelo, la porosidad, la estructura del suelo, y la presencia de grietas, fracturas o vacíos. Los suelos con partículas más grandes y bien interconectadas tienden a tener una permeabilidad más alta que los suelos con partículas más finas y compactas.

La permeabilidad se puede expresar mediante la Ley de Darcy, que establece que el flujo de agua a través de un suelo es proporcional al gradiente hidráulico y a la conductividad hidráulica del suelo. La conductividad hidráulica es una medida de la capacidad del suelo para transmitir agua y se representa por el símbolo "k". Se mide en unidades de velocidad, como centímetros por segundo (cm/s) o metros por día (m/d).

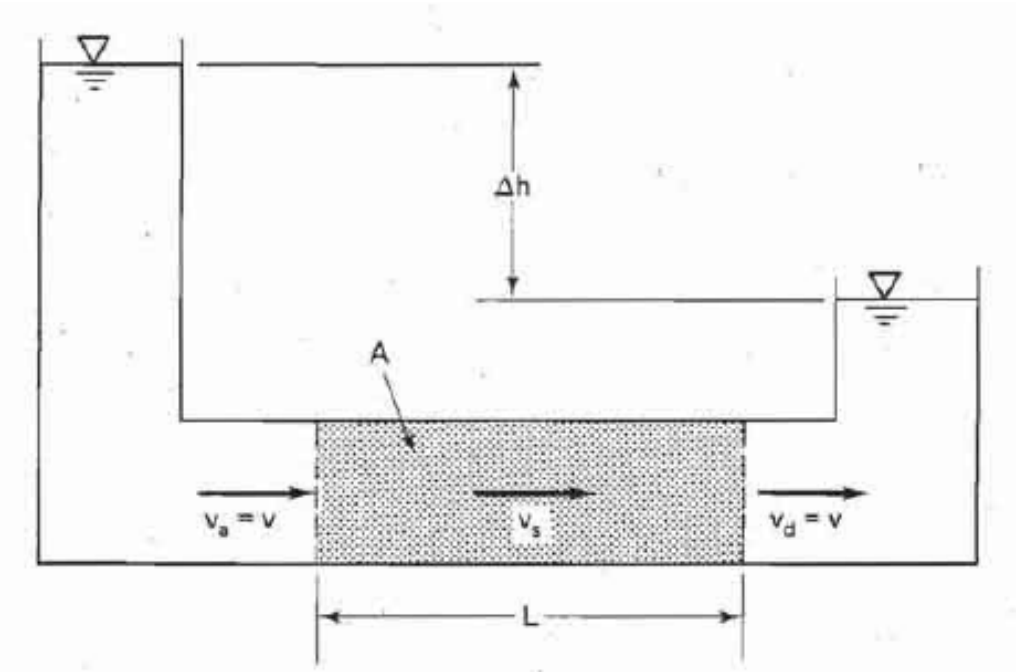



**Figura 5.1. Flujo de agua en un medio poroso.**

$$Q = k\frac{\Delta h}{L}\,A$$

El análisis de la permeabilidad en suelos se puede realizar a través de pruebas de laboratorio y pruebas de campo. Algunas de las técnicas más comunes son:

a) Prueba de permeabilidad en laboratorio utilizando el permeámetro de carga constante o el permeámetro de carga variable.
b) Prueba de permeabilidad en campo utilizando el ensayo de permeabilidad in situ o la prueba Lugeon para determinar la permeabilidad de suelos fracturados o rocosos.
c) Prueba de permeabilidad mediante el ensayo de bombeo o el ensayo de permeabilidad por pozo en acuíferos confinados.

La determinación de la permeabilidad es esencial para el diseño adecuado de obras de ingeniería que involucren el flujo de agua en suelos. Conociendo la permeabilidad del suelo, los ingenieros pueden tomar decisiones informadas sobre la planificación, diseño y construcción de proyectos geotécnicos, asegurando la estabilidad y la funcionalidad de las estructuras en contacto con el agua subterránea o superficial.

## Coeficiente de Permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad, también conocido como la conductividad hidráulica, es una medida de la capacidad de un suelo para transmitir el flujo de agua a través de él. Representa la velocidad a la que el agua puede moverse a través del suelo bajo un gradiente hidráulico específico. Se denota generalmente por la letra "k" y se mide en unidades de velocidad, como centímetros por segundo (cm/s) o metros por día (m/d).

El coeficiente de permeabilidad depende de varios factores, incluyendo el tamaño y la distribución de las partículas del suelo, la porosidad, la estructura del suelo y la presencia de grietas o fracturas. Los suelos con partículas más grandes y bien interconectadas tienden a tener un coeficiente de permeabilidad más alto, lo que significa que son más permeables y permiten que el agua fluya a una velocidad mayor.

Por otro lado, los suelos con partículas más finas y compactas tienen un coeficiente de permeabilidad más bajo, lo que los hace menos permeables y restringe el flujo de agua.

El coeficiente de permeabilidad se puede determinar mediante pruebas de laboratorio o pruebas de campo específicas, como el ensayo de permeabilidad en laboratorio utilizando un permeámetro de carga constante o variable, o el ensayo de permeabilidad in situ.

Es importante conocer el coeficiente de permeabilidad del suelo en proyectos de ingeniería geotécnica y civil, ya que influye en el comportamiento y la estabilidad de estructuras y cimentaciones, así como en el diseño adecuado de sistemas de drenaje y control de agua. Un suelo con alta permeabilidad puede requerir medidas especiales para evitar problemas de filtración o erosión, mientras que un suelo con baja permeabilidad puede necesitar técnicas de drenaje para evitar acumulaciones de agua.

## Permeámetro de carga constante

El permeámetro de carga constante es un equipo utilizado en el laboratorio para determinar el coeficiente de permeabilidad (conductividad hidráulica) de un suelo mediante pruebas de permeabilidad. Esta prueba es una de las técnicas más comunes para evaluar la permeabilidad de suelos granulares, como grava y arena.

El permeámetro de carga constante se compone principalmente de los siguientes elementos:

Celda de permeabilidad: Es una celda cilíndrica o rectangular que contiene la muestra de suelo. La celda tiene paredes laterales impermeables y bases permeables a través de las cuales puede fluir el agua.

Base permeable: En la base de la celda, se coloca una base permeable, generalmente hecha de arena o material similar, que permite que el agua fluya a través de ella hacia la muestra de suelo.

Dispositivo de carga constante: Es un sistema que suministra agua a una tasa constante a la muestra de suelo. Esto se logra mediante un dispositivo de control de flujo y un suministro de agua regulado. La carga constante garantiza que el gradiente hidráulico en la muestra se mantenga constante durante la prueba.

El procedimiento para realizar una prueba de permeabilidad con el permeámetro de carga constante es el siguiente:

1) Preparación de la muestra: Se prepara una muestra representativa del suelo y se coloca dentro de la celda de permeabilidad. Se asegura que la muestra esté compactada y libre de espacios vacíos.
2) Saturación de la muestra: Se satura completamente la muestra de suelo con agua, asegurándose de que todas las partículas estén saturadas y no haya aire atrapado en el interior.
3) Establecimiento de la carga constante: Se ajusta el flujo de agua para que se mantenga una carga constante en la muestra durante toda la prueba.
4) Medición del caudal de agua: Se mide el caudal de agua que fluye a través de la muestra a intervalos de tiempo regulares.
5) Cálculo de la permeabilidad: Con los datos recopilados, se calcula el coeficiente de permeabilidad del suelo utilizando la Ley de Darcy y la ecuación que relaciona el caudal de agua, la carga constante y la permeabilidad.

En un permeámetro de carga constante, el coeficiente de permeabilidad se obtiene como:

$$\boldsymbol{k = \frac{Q\,L}{h\,A\,t}}$$

El resultado de la prueba es el coeficiente de permeabilidad, que proporciona información importante sobre la capacidad del suelo para permitir el flujo de agua. Esta información es esencial para el diseño y construcción de proyectos geotécnicos, como sistemas de drenaje, cimentaciones y obras de control de agua.

## Permeámetro de carga variable

l permeámetro de carga variable es otro equipo utilizado en el laboratorio para determinar el coeficiente de permeabilidad (conductividad hidráulica) de un suelo mediante pruebas de permeabilidad. A diferencia del permeámetro de carga constante, este tipo de permeámetro permite aplicar diferentes gradientes hidráulicos en la muestra de suelo durante la prueba.

El permeámetro de carga variable se compone principalmente de los siguientes elementos:

1) Celda de permeabilidad: Es similar a la celda utilizada en el permeámetro de carga constante. Puede ser cilíndrica o rectangular y contiene la muestra de suelo. La celda tiene paredes laterales impermeables y bases permeables para permitir el flujo de agua.

2) Base permeable: Al igual que en el permeámetro de carga constante, se coloca una base permeable en la parte inferior de la celda, permitiendo que el agua fluya a través de ella hacia la muestra de suelo.
3) Dispositivo de carga variable: En este caso, el equipo permite variar la carga hidráulica o el gradiente hidráulico aplicado a la muestra durante la prueba. Puede lograrse mediante un dispositivo de control de flujo y un suministro de agua regulado, que ajusta la tasa de flujo de agua para obtener diferentes gradientes.

El procedimiento para realizar una prueba de permeabilidad con el permeámetro de carga variable es similar al del permeámetro de carga constante, pero con la capacidad de variar la carga hidráulica durante la prueba. Esto permite obtener datos a diferentes gradientes hidráulicos, lo que proporciona información adicional sobre el comportamiento de permeabilidad del suelo en diferentes condiciones.

Al variar la carga hidráulica, es posible determinar cómo cambia la permeabilidad del suelo a diferentes tasas de flujo de agua. Esto es especialmente útil en suelos no saturados o cuando se desea simular diferentes condiciones de flujo en el suelo, como variaciones en el nivel freático o en la tasa de infiltración.

El permeámetro de carga variable es una herramienta valiosa en la caracterización de la permeabilidad de suelos en condiciones más realistas y representa una extensión del permeámetro de carga constante para obtener una visión más completa del comportamiento de flujo de agua en los suelos.

En un permeámetro de carga variable, la ecuación que da como resultado el coeficiente de permeabilidad es:

$$\boldsymbol{k = 2.3\ \frac{a\,L}{A\,\Delta t} log \frac{h_1}{h_2}}$$

Algunos rangos de permeabilidad para diversos tipos de suelos se presentan en la siguiente figura.

(after Casagrande and Fadum, 1939)

| $k$ (cm/sec) | Soils type | Drainage conditions |
|---|---|---|
| $10^1$ to $10^2$ | Clean gravels | Good |
| $10^1$ | Clean sand | Good |
| $10^{-1}$ to $10^{-4}$ | Clean sand and gravel mixtures | Good |
| $10^{-5}$ | Very fine sand | Poor |
| $10^{-6}$ | Silt | Poor |
| $10^{-7}$ to $10^{-9}$ | Clay soils | Practically impervious |

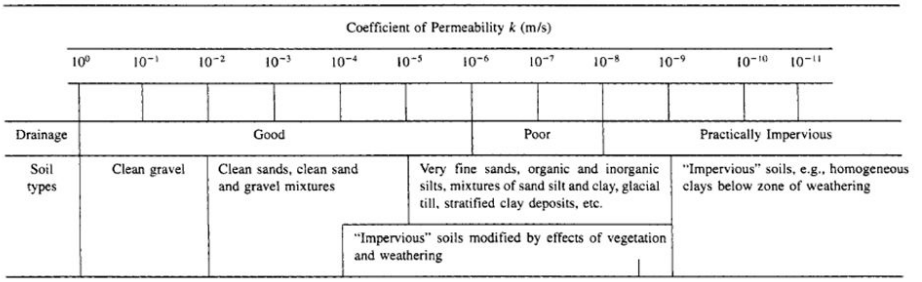



**Figura 5.2. Rango de valores de permeabilidad para diversos suelos.**

# CONSOLIDACIÓN

La consolidación en suelos es un proceso geotécnico que se refiere a la compresión gradual y la disminución del volumen de un suelo debido a la aplicación de cargas o presiones. Ocurre principalmente en suelos finos, como arcillas y limos, que son más susceptibles a este fenómeno que los suelos gruesos (grava y arena).

Cuando una carga se aplica sobre un suelo, las partículas del suelo se acercan más entre sí, lo que provoca que los espacios vacíos entre las partículas disminuyan en tamaño. Esta reducción de volumen se debe al drenaje lento del agua contenida en los poros del suelo debido a la baja permeabilidad de los suelos finos. El agua atrapada en los poros actúa como un fluido que resiste la compresión y dificulta el drenaje. A medida que el agua drena lentamente, las partículas se asientan y el suelo experimenta una compresión gradual.

El proceso de consolidación es de particular importancia en proyectos de ingeniería geotécnica, especialmente aquellos que involucran cargas sostenidas, como construcción de edificios, presas, terraplenes y cimentaciones de estructuras. Si el suelo no se ha consolidado por completo antes de

la construcción, pueden ocurrir asentamientos adicionales en el suelo con el tiempo, lo que puede afectar la estabilidad y el rendimiento de las estructuras.

En la ingeniería geotécnica, se llevan a cabo pruebas de consolidación para determinar las características de consolidación de un suelo y predecir la cantidad de asentamiento que se puede esperar bajo diferentes cargas. Esta información es crucial para el diseño adecuado de cimentaciones y la planificación de la construcción para evitar asentamientos excesivos que puedan dañar las estructuras.

En resumen, la consolidación en suelos es un proceso natural de compresión y asentamiento gradual en suelos finos debido a la aplicación de cargas y la expulsión lenta del agua intersticial. Es un fenómeno importante para considerar en la ingeniería geotécnica para garantizar la estabilidad y la seguridad de las estructuras construidas sobre suelos consolidables.

## CONSOLIDACION Y ASENTAMIENTOS

La consolidación y los asentamientos están estrechamente relacionados en el contexto de la ingeniería geotécnica, ya que ambos se refieren a los cambios en el suelo debido a la aplicación de cargas.

Consolidación: La consolidación es el proceso de compresión gradual y reducción de volumen que experimenta un suelo fino (arcillas y limos) cuando se le aplica una carga. Cuando se coloca una carga sobre el suelo, las partículas del suelo se acercan más entre sí, lo que disminuye los espacios vacíos entre ellas. Como resultado, el agua contenida en los poros del suelo se drena lentamente debido a la baja permeabilidad de los suelos finos. La consolidación puede llevar días, semanas o incluso años, dependiendo de las características del suelo y la magnitud de la carga aplicada. Durante este proceso, el suelo experimenta asentamientos verticales. La consolidación es un fenómeno que ocurre en suelos finos no saturados.

Asentamientos: Los asentamientos son las deformaciones verticales que experimenta el suelo cuando se somete a cargas. Los asentamientos pueden ser temporales o permanentes y pueden ocurrir en cualquier tipo de suelo, ya sean suelos finos o gruesos. Cuando se construyen estructuras, como edificios o carreteras, sobre el suelo, estas estructuras aplican cargas al suelo, lo que puede provocar asentamientos. Los asentamientos pueden ser uniformes, distribuidos de manera uniforme en toda el área de la estructura, o pueden ser asentamientos diferenciales, donde algunas partes del suelo se asientan más que otras, lo que puede provocar problemas de nivelación y daños en las estructuras.

En resumen, la consolidación se refiere al proceso de compresión y reducción de volumen que experimenta un suelo fino cuando se le aplica una carga, y esto conduce a asentamientos verticales. Los asentamientos son las deformaciones verticales que ocurren en el suelo debido a la aplicación de cargas, y pueden ocurrir tanto en suelos finos como en suelos gruesos. La consideración de la consolidación y los asentamientos es esencial en la ingeniería geotécnica para el diseño adecuado de cimentaciones y para prevenir daños en las estructuras construidas sobre el suelo.

# TEORIA DE CONSOLIDACION

## GENERALIDADES

La teoría de consolidación de Terzaghi, desarrollada por el ingeniero geotécnico Karl Terzaghi en la década de 1920, es uno de los pilares fundamentales de la ingeniería geotécnica. Esta teoría se centra en el fenómeno de consolidación en suelos finos, como arcillas y limos, cuando se les aplica una carga.

a) La teoría de consolidación de Terzaghi se basa en las siguientes premisas y conceptos clave:
b) Compresibilidad del suelo: Terzaghi consideró que los suelos finos son compresibles y que la deformación por consolidación se produce principalmente debido a la expulsión del agua de los poros del suelo durante el proceso de carga. El agua en los poros actúa como un fluido que resiste la compresión, lo que ralentiza el proceso de consolidación.
c) Ley de Darcy: La teoría utiliza la Ley de Darcy, que establece que la velocidad de drenaje de agua en el suelo es proporcional al gradiente hidráulico y a la conductividad hidráulica del suelo.
d) Coeficiente de consolidación: Terzaghi introdujo el coeficiente de consolidación (cv), que es una medida de la velocidad a la que un suelo se consolida bajo una carga. El coeficiente de consolidación se relaciona con la conductividad hidráulica y la compresibilidad del suelo.

El proceso de consolidación se caracteriza por dos fases:

Fase de consolidación primaria: En esta etapa inicial, la carga aplicada al suelo se transmite principalmente a través del agua, lo que provoca la expulsión del agua de los poros. El suelo se contrae debido a la pérdida de volumen de agua y experimenta asentamientos primarios.

Fase de consolidación secundaria: Después de la fase de consolidación primaria, el suelo continúa drenando el agua de los poros y experimenta una compresión adicional debido a la redistribución de las tensiones. Esta fase puede ser más prolongada y puede conducir a asentamientos adicionales en el suelo.

Terzaghi formuló ecuaciones matemáticas para describir el proceso de consolidación y para calcular la cantidad de asentamiento que ocurrirá en un suelo saturado bajo una carga aplicada. Estas ecuaciones son conocidas como las ecuaciones de consolidación de Terzaghi y son fundamentales para el análisis y diseño de cimentaciones y otras estructuras construidas sobre suelos finos.

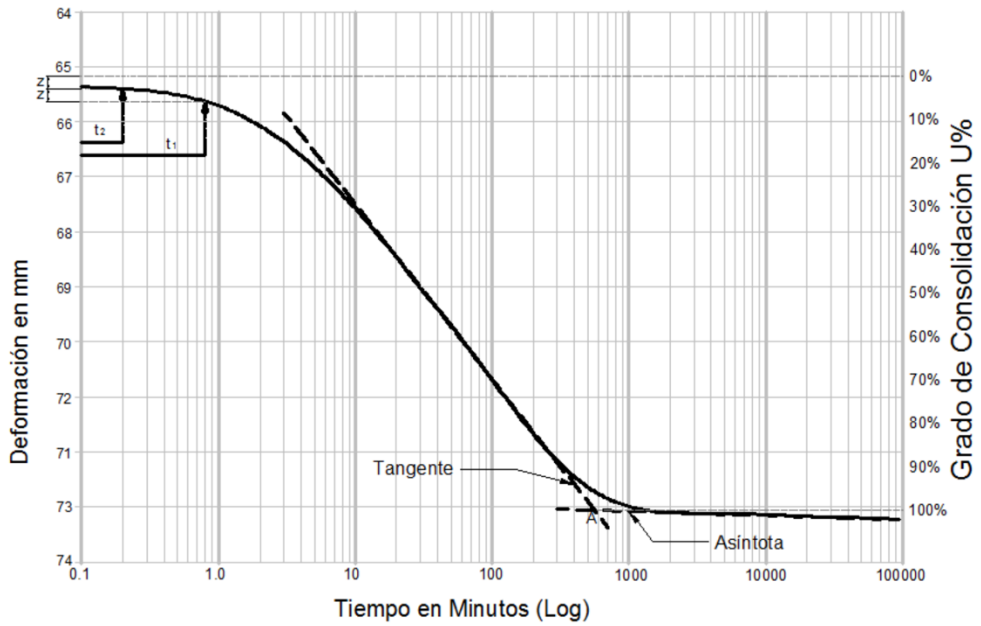



**Figura 6.1. Curva de asentamiento vs. Tiempo.**

## Coeficiente de consolidación.

A través de conocer el grado de consolidación del suelo (U%) , y el tiempo para que este ocurra (t), a través del factor tiempo (T) de las curvas teóricas de la solución formal de la Teoría de consolidación de Terzaghi, se puede obtener el coeficiente de consolidación ($c_v$) del suelo.

$$\boldsymbol{T_v} = \frac{c_v t}{H_{dr}^2}$$

# CURVA DE COMPRESIBILIDAD

La curva de compresibilidad se representa gráficamente con la relación entre la presión efectiva y el índice de vacíos. Para obtener la curva de compresibilidad se realizan ensayos de consolidación unidimensional en los que se aplican cargas crecientes a una muestra de suelo y se mide la deformación resultante. La curva de compresibilidad se utiliza para determinar la carga de preconsolidación y el índice de compresión del suelo. La carga de preconsolidación es la carga máxima que ha soportado el suelo en el pasado y se utiliza para determinar si el suelo está preconsolidado o no. El índice de compresión es una medida de la compresibilidad del suelo y se utiliza para calcular el asentamiento del suelo bajo carga.

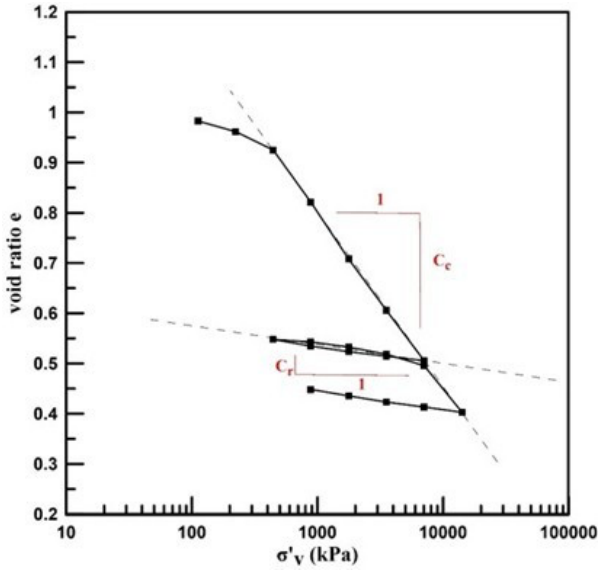



**Figura 6.2. Curva de compresibilidad.**

# INDICE DE COMPRESIBILIDAD

El índice de compresibilidad es una medida de la compresibilidad del suelo y se utiliza para calcular el asentamiento del suelo bajo carga12. Un rango típico de índice de compresión es de 0,1 a 102. En general, la compresibilidad es aproximadamente proporcional al índice de plasticidad1. Mientras mayor es el índice de plasticidad, mayor es la compresibilidad del suelo.

$$\boldsymbol{C_C} = -\frac{(e_2 - e_1)}{\Delta \log(\sigma_2 / \sigma_1)}$$

# RESISTENCIA AL CORTANTE EN SUELOS

La resistencia al corte en suelos es una propiedad mecánica fundamental que se refiere a la capacidad del suelo para resistir fuerzas de corte o esfuerzos cortantes sin sufrir un colapso o una falla. Esta resistencia es de gran importancia en ingeniería geotécnica y es un factor clave en el diseño y construcción de diversas estructuras, como cimientos, terraplenes, muros de contención, entre otros.

La resistencia al corte en suelos se debe a la interacción de las partículas del suelo y sus características de cohesión y fricción interna. La resistencia al corte se puede clasificar en dos componentes principales:

Cohesión (c): La cohesión es la resistencia interna de un suelo debido a las fuerzas de atracción entre las partículas. Se refiere a la capacidad del suelo para mantenerse unido incluso cuando no hay presión aplicada a las caras de corte. La cohesión es más relevante en suelos finos, como arcillas, que tienen partículas muy pequeñas con cargas eléctricas que interactúan entre sí.

Ángulo de fricción interna (φ): El ángulo de fricción interna es una medida de la resistencia al corte debido a la fricción entre las partículas del suelo. Se refiere a la resistencia de un suelo a deslizarse a lo largo de un plano de corte bajo una presión aplicada. Los suelos granulares, como arenas y gravas, tienden a tener un ángulo de fricción más alto debido a la menor influencia de la cohesión y una mayor interacción entre las partículas.

La resistencia al corte en suelos se evalúa mediante ensayos de corte en el laboratorio, como el ensayo de corte directo o el ensayo de corte triaxial, que aplican fuerzas controladas a muestras del suelo para determinar su capacidad para resistir esfuerzos cortantes. En la práctica de la ingeniería, es crucial tener en cuenta la resistencia al corte del suelo al diseñar estructuras y seleccionar métodos de construcción adecuados. El conocimiento de la resistencia al corte del suelo también es importante para evaluar la estabilidad de taludes y para prevenir problemas de asentamientos o deslizamientos en proyectos de ingeniería civil y construcción.

# PRUEBAS DE RESISTENCIA AL CORTE

Existen varias pruebas de laboratorio para determinar la resistencia al corte en suelos. Estas pruebas se utilizan para obtener datos precisos sobre la resistencia del suelo y sus parámetros de resistencia al corte, que son fundamentales para el diseño de proyectos geotécnicos y para evaluar la estabilidad de estructuras. A continuación, mencionaré dos de las pruebas más comunes:

## Ensayo de Corte Directo:

El ensayo de corte directo es uno de los métodos más sencillos y rápidos para determinar la resistencia al corte en suelos cohesivos y suelos granulares. En este ensayo, se toma una muestra cilíndrica del suelo y se corta a lo largo de un plano horizontal en su interior, dividiendo la muestra en dos mitades. Una de las mitades se mantiene fija en el equipo de ensayo, mientras que la otra mitad se mueve horizontalmente, aplicando una fuerza de corte.

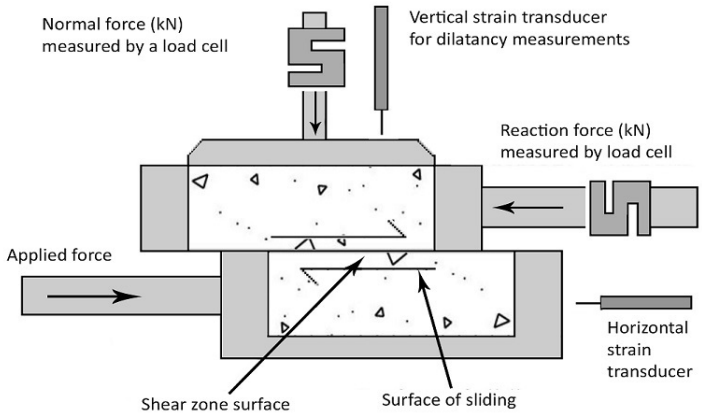



**Figura 7.1. Esquemático de la prueba de corte directo.**

Durante el ensayo, se mide la fuerza aplicada y la deformación del suelo para obtener el esfuerzo cortante y la deformación asociada. Luego, se calcula el ángulo de fricción interna (φ) y la cohesión (c) del suelo. Este ensayo es particularmente útil para suelos cohesivos y suelos con baja cohesión.

## Prueba de compresión axial no confinada

La prueba de compresión axial no confinada, también conocida como ensayo de compresión simple o ensayo triaxial no confinado, es un método de laboratorio utilizado para determinar la resistencia al corte de suelos cohesivos. A diferencia del ensayo de corte triaxial, en el ensayo de compresión axial no confinada, la muestra de suelo no se somete a una presión lateral confinante, lo que implica que solo se aplica una carga axial vertical para producir la falla por corte.

**Figura 7.2. Prueba de compresión axial no confinada en una muestra de suelo.**

## Ensayo de Corte Triaxial:

El ensayo de corte triaxial es un método más complejo que permite obtener una mayor cantidad de información sobre la resistencia al corte de suelos cohesivos y granulares. En este ensayo, se toma una muestra cilíndrica de suelo y se confina axialmente para simular las condiciones de esfuerzo in situ. La muestra se somete a una presión confinante controlada mientras se aplica una fuerza de corte a través de un pistón en el centro de la muestra. Se registran las deformaciones y los esfuerzos durante el ensayo, lo que permite calcular el ángulo de fricción interna (φ) y la cohesión (c) del suelo bajo diferentes condiciones de esfuerzo.

El ensayo de corte triaxial proporciona datos más precisos y una mejor comprensión del comportamiento del suelo bajo diferentes condiciones de esfuerzo, lo que lo hace más adecuado para proyectos geotécnicos críticos o situaciones donde se requiere una evaluación más detallada de la resistencia al corte.

Es importante tener en cuenta que la elección de la prueba adecuada depende del tipo de suelo y las condiciones específicas del proyecto. Los resultados de estas pruebas permiten a los ingenieros diseñar estructuras y cimentaciones de manera segura y eficiente, teniendo en cuenta las características mecánicas del suelo en la zona de interés.

**Figura 7.3. Equipo típico para prueba triaxial.**

## *Pruebas Triaxiales Drenadas y No Drenadas*

Las pruebas triaxiales drenadas y no drenadas son ensayos utilizados en geotecnia para determinar las propiedades mecánicas de los suelos, especialmente su resistencia al corte y su capacidad de deformación. Estas pruebas son esenciales en la ingeniería civil y geotécnica para diseñar cimentaciones, presas, carreteras y otros proyectos de ingeniería que involucran suelos. A continuación, se describen ambas pruebas:

## Prueba Triaxial No Drenada (UU - Unconsolidated Undrained):

Objetivo: Determinar la resistencia al corte no drenado de un suelo. Es decir, la resistencia al corte cuando no se permite que el agua drene del suelo durante la prueba.

Procedimiento: En esta prueba, una muestra intacta de suelo se coloca en un cilindro triaxial y se aplica una presión axial controlada mientras se mantiene la presión de poro constante (sin permitir que el agua drene). Luego, se aplica una fuerza lateral para inducir el corte en la muestra.

Resultados: La prueba proporciona datos sobre la resistencia al corte no drenada del suelo, que es importante para evaluar la estabilidad de las estructuras en suelos cohesivos y la capacidad de carga de las cimentaciones.

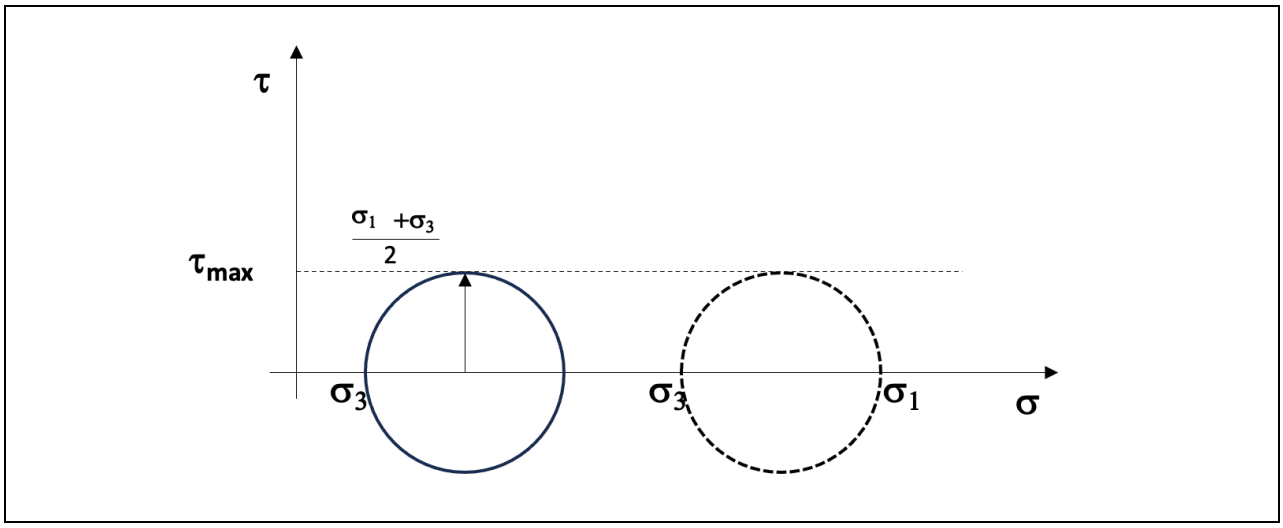



**Figura 7.4. Esquemático representando los círculos de Mohr a la falla para dos esfuerzos de confinamiento diferentes en la condición drenada y la envolvente de falla.**

Cuando no se permite el cambio de volumen de la muestra, la presión de poro aumenta debido a ese impedimento, y esto da lugar a que, aunque se aumente el esfuerzo de confinamiento, la diferencia entre los dos esfuerzos principales mayores permanecerá constante, resultando en una envolvente de falla horizontal ($\phi=0^o$) y por ende el valor del cortante es igual al promedio de la suma de esfuerzos principales.

Este valor de resistencia se conoce como $c_u$ o bien $S_u$, es decir, resistencia 'no' drenada del suelo. Anteriormente se le conocía simplemente como *cohesión*, sin embargo se ha venido por cambiarlo por su descripción más apropiada.

## Prueba Triaxial Drenada (CD - Consolidated Drained):

Objetivo: Determinar la resistencia al corte drenada de un suelo. Es decir, la resistencia al corte cuando se permite que el agua drene del suelo durante la prueba.

Procedimiento: En esta prueba, una muestra de suelo se coloca en un cilindro triaxial y se aplica una presión axial controlada mientras se permite que el agua drene del suelo. Luego, se aplica una fuerza lateral para inducir el corte en la muestra.

Resultados: La prueba proporciona datos sobre la resistencia al corte drenada del suelo, que es relevante para evaluar la capacidad de carga de suelos granulares o rocosos, donde el drenaje es más efectivo y rápido en comparación con los suelos cohesivos.

En resumen, la principal diferencia entre las pruebas triaxiales drenadas y no drenadas radica en si se permite o no que el agua drene durante la prueba (cambio de volumen). La elección de la prueba adecuada depende del tipo de suelo que se esté evaluando y de las condiciones específicas del proyecto geotécnico en cuestión.

En una prueba triaxial 'no' drenada, se tendrá idealmente un suelo que describe su resistencia enteramente por fricción, y con c= 0.0. De esta manera la envolvente de falla de dicho suelo se describiría como $\tau=\sigma \tan\phi$.

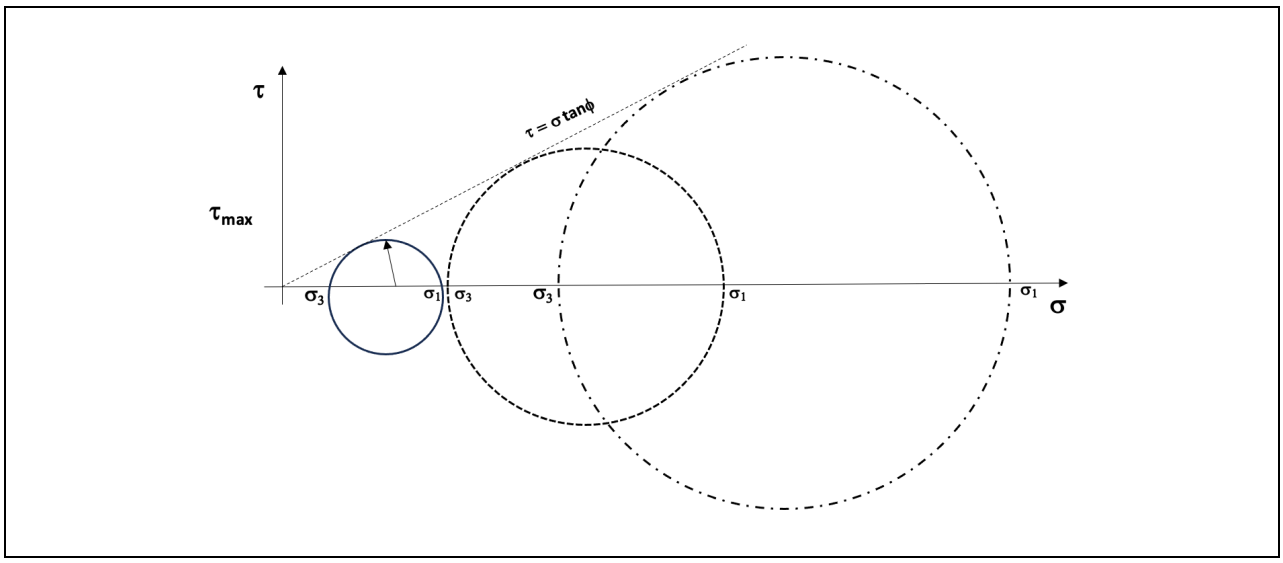



**Figura 7.5. Diagrama de los círculos de Mohr a la falla de tres presiones de confinamiento distintas en condición drenada y la correspondiente envolvente de falla.**

Existe una condición debatible, pero generalmente aceptada en condición drenada, en la cual el suelo exhibe una condición *mixta*, y por ende se puede obtener una 'cohesion drenada' (c') y el correspondiente ángulo de fricción interna. La expresión de la línea de falla seria entonces $\tau = c' + \sigma \tan\phi$.

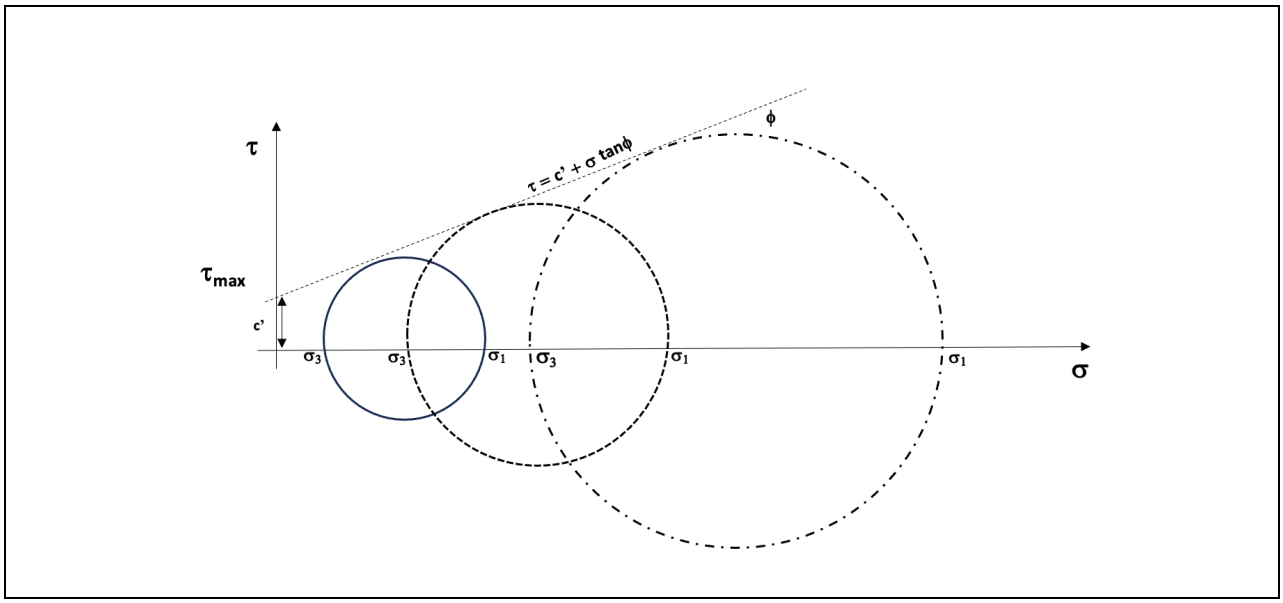



**Figura 7.6. Diagrama de los círculos de Mohr a la falla de tres presiones de confinamiento distintas en condición drenada 'mixta' con c' y ϕ con la correspondiente envolvente de falla.**

# INTRODUCCION A LA MECANICA DE ROCAS

La mecánica de rocas es una rama de la geología y la ingeniería civil que se centra en el estudio del comportamiento mecánico de las rocas y su respuesta a las fuerzas y cargas aplicadas. Esta disciplina es fundamental en proyectos relacionados con la construcción, la minería, la exploración geotécnica y la geotecnia, ya que ayuda a comprender cómo las rocas se comportan bajo diferentes condiciones y cómo pueden afectar la seguridad y la estabilidad de estructuras y obras subterráneas.

Algunos de los aspectos clave que se estudian en la mecánica de rocas incluyen:

a) Resistencia de las rocas: Se analiza la capacidad de las rocas para soportar cargas y tensiones sin fallar. Esto implica la determinación de propiedades como la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción y la resistencia a la flexión.
b) Deformación de las rocas: Se investiga cómo las rocas se deforman bajo diferentes condiciones de carga y temperatura. Esto es importante para comprender cómo se comportan en situaciones de carga estática o dinámica.
c) Fracturación y fisuración: Se estudia la formación de fracturas y fisuras en las rocas, así como su influencia en la resistencia y la estabilidad de estas.

d) Comportamiento en condiciones geotécnicas: Se analiza cómo las rocas interactúan con el suelo y el agua subterránea en aplicaciones geotécnicas, como cimientos de edificios, presas, túneles y excavaciones.
e) Estabilidad de taludes y excavaciones: La mecánica de rocas se aplica para evaluar la estabilidad de pendientes naturales o excavaciones en roca, lo que es crucial en la planificación y ejecución de proyectos de construcción y minería.
f) Diseño de estructuras en roca: Se utiliza la mecánica de rocas para diseñar estructuras subterráneas, como túneles, cavernas y presas de roca, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de las rocas circundantes.
g) Evaluación de riesgos geológicos: Ayuda a identificar y mitigar riesgos relacionados con eventos geológicos, como deslizamientos de tierra, caídas de rocas y sismos.

En resumen, la mecánica de rocas es una disciplina interdisciplinaria que combina principios de la geología y la ingeniería para comprender y predecir el comportamiento de las rocas en diversas aplicaciones prácticas. Esto es esencial para garantizar la seguridad y la eficiencia en proyectos geotécnicos y de construcción que involucran rocas.

## INDICE DE CALIDAD DE ROCA (RQD)

El Índice de Calidad de Roca (RQD, por sus siglas en inglés: Rock Quality Designation) es una medida utilizada en la geología y la mecánica de rocas para evaluar la calidad y la integridad de una masa de roca en un sitio específico. El RQD se utiliza comúnmente en la industria de la construcción, la minería y la ingeniería geotécnica para determinar la aptitud de una roca para soportar estructuras o excavaciones subterráneas. El índice se basa en la cantidad de roca intacta o sin fracturas en una muestra determinada y se expresa como un porcentaje.

Para calcular el RQD, se sigue un proceso específico:

Toma de muestras: Se extraen muestras de roca de un sitio utilizando herramientas adecuadas, como barrenos o perforadoras de núcleo. Estas muestras deben representar fielmente la condición de la roca en el área de interés.

Conteo de fragmentos: Se inspecciona cada muestra de roca para identificar y contar los fragmentos o porciones fracturadas. Estos fragmentos pueden variar en tamaño, pero generalmente se consideran aquellos que tienen una longitud mayor a 100 mm.

Cálculo del RQD: El RQD se calcula utilizando la siguiente fórmula:

> RQD (%) = (Longitud total de la roca intacta en todas las muestras / Longitud total de las muestras) x 100

El resultado se expresa como un porcentaje, donde un valor más alto indica una mayor calidad de la roca, es decir, una menor fracturación y una mayor integridad.

El RQD es útil para evaluar la conveniencia de llevar a cabo excavaciones subterráneas, como túneles o minas, y para determinar la necesidad de medidas de estabilización o refuerzo en proyectos de construcción y geotecnia. Una alta puntuación de RQD generalmente indica que la roca es más resistente y adecuada para proyectos de ingeniería, mientras que un RQD bajo puede indicar la presencia de fracturas y debilidades que pueden requerir medidas adicionales de soporte.

Es importante tener en cuenta que el RQD es solo una de las muchas propiedades que se evalúan en la mecánica de rocas y la ingeniería geotécnica, y su uso se combina con otros datos geotécnicos (resistencia a la compresión, módulo de elasticidad del macizo rocoso, su geología estructural, etc.) para tomar decisiones informadas sobre la estabilidad y la seguridad en proyectos relacionados con la roca.

# REFERENCIAS DEL CURSO


- (2006) Juárez Badillo, E., Rico Rodríguez, A., Mecánica de Suelos (Tomo 1), Editorial Limusa.
- (2010) Lambe, T.W. y Whitman R.V., Mecanica de Suelos, Editorial Limusa.
- (2001) Das, B.M., Fundamentos de Ingenieria Geotecnica, International Thompson.


- Liga para videos Youtube (Clase del Dr. Carlos A. Charles-Cruz 2001-2002):

- Apuntes de FUNDAMENTOS: Notas de clase disponibles (Kindle®)
  Más información:

Este compendio de conceptos relacionados con los temas tratados en el curso de Fundamentos de Suelos (y Rocas) han sido escritos con el fin de brindar una referencia rapida de conceptos teóricos y de procedimientos para complementar lo tratado en el aula y el laboratorio. Esperando que sirvan su proposito y enciendan el interes del alumno por indagar más a fondo cada uno de los temas del curso, que, dada la complejidad de tema, no se pueden abarcar con la profundidad deseada.

Dr. C. A. Charles Cruz. Septiembre 2023